

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO INDUSTRIAL PARA EL
SECADO Y DESPRENDIMIENTO DEL BARNIZ EN BOBINADOS PARA
LA EMPRESA MALEMEC S.A.**

**AUTORES:
VLADIMIR LENIN NOGALES NIETO
FERNANDO VICENTE TAPIA BOLAGAY**

**TUTOR:
NÚÑEZ VERDEZOTO HAMILTON LEONARDO**

Quito, julio del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Vladimir Lenin Nogales Nieto con documento de identificación N° 1721547469 y Fernando Vicente Tapia Bolagay con documento de identificación N° 1720679388, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO INDUSTRIAL PARA EL SECADO Y DESPRENDIMIENTO DEL BARNIZ EN BOBINADOS PARA LA EMPRESA MALEMEC S.A.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Vladimir Lenin Nogales Nieto
C.I. 1721547469



Fernando Vicente Tapia Bolagay
C.I. 1720679388

Quito, julio del 2018

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo Proyecto Técnico, “AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO INDUSTRIAL PARA EL SECADO Y DESPRENDIMIENTO DEL BARNIZ EN BOBINADOS PARA LA EMPRESA MALEMEC S.A.” realizado por Vladimir Lenin Nogales Nieto y Fernando Vicente Tapia Bolagay, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2018



Núñez Verdezoto Hamilton Leonardo

C.I. 1712981487

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado salud y vida para lograr mis objetivos y permitirme alcanzar esta gran meta en mi vida profesional.

A mis padres

A mis padres Lucila y Lenin, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mis familiares

A mi tío Fabián por ser mi ejemplo a seguir y del cual valoro muchas cualidades como la constancia, la fortaleza y la generosidad. A mis abuelitos que, día a día, me han brindado su apoyo incondicional.

Vladimir

Dedico el presente proyecto a mis padres Roque y Rosario quienes han sido los pilares fundamentales para lograr este objetivo profesional, por su motivación y lucha constante al brindarme todo el apoyo incondicional durante todo este proceso y etapa importante de mi vida.

A Dios, por darme salud y vida. Y sin duda alguna este proyecto está dedicado a mi esfuerzo, valentía y perseverancia para, día a día, luchar por mi objetivo y culminar con éxito esta etapa de mi formación profesional.

Fernando

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de manera muy especial a los socios fundadores de la Empresa MALEMEC S.A. quienes nos han permitido desarrollar el presente proyecto técnico de titulación.

Nuestra gratitud eterna al ingeniero Hamilton Nuñez, nuestro tutor, quien nos ha guiado con paciencia y sabiduría durante la realización del presente proyecto técnico.

Vladimir y Fernando

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR..... | i |
| DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR..... | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | v |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| INTRODUCCIÓN | xiii |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 Problema de estudio | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 1 |
| 1.3 Objetivos | 2 |
| 1.3.1 Objetivo General | 2 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 2 |
| 1.4 Beneficiarios | 2 |
| CAPÍTULO 2 | 3 |
| MARCO TEÓRICO | 3 |
| 2.1 Empresa MALEMEC S.A..... | 3 |
| 2.2 Proyectos similares..... | 4 |
| 2.3 Espacio de estados..... | 7 |
| 2.3.1 Variables de estado | 7 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2 Ecuaciones de espacio de estado..... | 7 |
| 2.4 Modelamiento | 8 |
| 2.5 Simulación..... | 9 |
| CAPÍTULO 3..... | 10 |
| DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN | 10 |
| 3.1 Descripción del hardware..... | 10 |
| 3.2 Funcionamiento del horno eléctrico industrial..... | 11 |
| 3.2.2 Plano de Instrumentación..... | 13 |
| 3.3 Caracterización de la planta | 14 |
| 3.3.1 Secciones de linealización..... | 16 |
| 3.4 Modelo matemático..... | 18 |
| 3.5 Diseño de los controladores | 23 |
| 3.6 Simulación de los controladores | 25 |
| 3.7 HMI del proceso..... | 28 |
| 3.7.1 Termocupla | 28 |
| 3.7.2 Módulo MAX 6675..... | 29 |
| 3.7.3 Tarjeta STM32F4 Discovery..... | 29 |
| 3.7.4 Proceso | 30 |
| 3.8 Implementación de controladores | 31 |
| 3.8.1 Configuración de Pantalla Touch..... | 35 |
| CAPÍTULO 4..... | 38 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS | 38 |
| 4.1 Simulación..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 4.2 Implementación..... | 40 |
| 4.3 Contraste simulación vs. Implementación | 44 |
| CONCLUSIONES | 49 |
| RECOMENDACIONES | 51 |
| REFERENCIAS | 52 |
| ANEXOS | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Ubicación empresa MALEMEC S.A | 3 |
| Figura 2.2 Horno eléctrico monofásico..... | 4 |
| Figura 2.3 Implementación del filtro de Kalman en Simulink..... | 5 |
| Figura 2.4 Implementación de horno eléctrico industrial | 6 |
| Figura 2.5 Representación múltiple de modelamiento..... | 9 |
| Figura 3.1 Dimensiones horno industrial eléctrico | 11 |
| Figura 3.2 Flujo de procesos horno industrial eléctrico | 12 |
| Figura 3.3 Plano de instrumentación..... | 13 |
| Figura 3.4 Programa en Matlab para adquisición de datos | 14 |
| Figura 3.5 Bloque para obtención del tiempo | 15 |
| Figura 3.6 Bloque para obtención de la temperatura | 15 |
| Figura 3.7 Bloque para configurar el puerto USB | 15 |
| Figura 3.8 Primera sección de linealización | 16 |
| Figura 3.9 Segunda sección de linealización | 17 |
| Figura 3.10 Tercera sección de linealización..... | 17 |
| Figura 3.11 Secciones lineales del comportamiento de la planta..... | 18 |
| Figura 3.12 Programa en Matlab para obtención de datos para el diseño del controlador del sistema..... | 19 |
| Figura 3.13 Respuesta de la primera sección lineal | 20 |
| Figura 3.14 Cálculos de valores de la función de transferencia..... | 22 |
| Figura 3.15 Cálculos de constantes del controlador..... | 24 |
| Figura 3.16 Desarrollo de controlador para la primera sección. | 25 |
| Figura 3.17 Simulación de controlador para la primera sección..... | 25 |
| Figura 3.18 Desarrollo de controlador para la segunda sección. | 26 |
| Figura 3.19 Simulación de controlador para la segunda sección | 26 |
| Figura 3.20 Simulación de controlador para el segundo rango o sección..... | 27 |
| Figura 3.21 Simulación de controlador para el tercer rango o sección | 27 |
| Figura 3.22 Curvas característica de las termocuplas | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.23 Diagrama de bloques del Proceso..... | 30 |
| Figura 3.24 Algoritmo para la implementación de los controladores | 31 |
| Figura 3.25 Primera parte del algortimo de implementación de los controladores. .. | 33 |
| Figura 3.26 Segunda parte del algortimo de implementación de los controladores. . | 34 |
| Figura 3.27 Pantalla inicial del HMI..... | 35 |
| Figura 3.28 Pantalla Principal del HMI | 36 |
| Figura 4.1 Curva característica del resultado de la simulación del controlador basado en espacio de estados. | 38 |
| Figura 4.2 Curva característica del resultado de la implementación del controlador basado en espacio de estados. | 41 |
| Figura 4.3 Gráfica de la simulación vs. la implementación del controlador con un Setpoint de 180 °C | 44 |
| Figura 4.4 Diagrama de barras del máximo sobre impulso del controlador simulado e implementado..... | 47 |
| Figura 4.5 Diagrama de barras del tiempo de establecimiento del controlador simulado e implementado. | 47 |
| Figura 4.6 Diagrama de barras del error en estado estacionario del controlador simulado e implementado | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 Simbología del plano de instrumentación | 13 |
| Tabla 3.2 Valores de la función de transferencia de las secciones lineales restantes | 22 |
| Tabla 3.3 Constantes para desarrollo del controlador | 24 |
| Tabla 3.4 Características de la tarjeta STM32F4 | 29 |
| Tabla 3.5 Descripción de los componentes de la Pantalla Principal | 37 |
| Tabla 4.1 Parámetros del controlador simulado basado en espacio de estados. | 40 |
| Tabla 4.2 Parámetros del controlador implementado basado en espacio de estados. | 43 |
| Tabla 4.3 Tabla de datos en la etapa de funcionamiento de la planta | 43 |
| Tabla 4.4 Tabla de consumo de corriente en el horno eléctrico industrial | 46 |
| Tabla 4.5 Tabla de comparación de parámetros del controlador simulado y el implementado..... | 46 |

RESUMEN

El presente proyecto técnico se desarrolló en la Empresa MALEMEC S.A, la cual está ubicada en el sector del Beaterio al sur de Quito, en el área de hornos eléctricos industriales, con el objetivo de optimizar los tiempos de uso y disminuir el pago del suministro de energía eléctrica, el horno eléctrico industrial es una herramienta de trabajo que se utiliza para realizar el proceso de curado o secado del barniz que se aplica a los bobinados de las máquinas eléctricas (motores, generadores y transformadores). Para obtener los beneficios antes mencionados se modificaron los elementos de control y potencia, además se implementó un HMI; que permite el control y supervisión del proceso de control de temperatura del horno eléctrico industrial. El sensor de temperatura (termocupla) envía los datos obtenidos de la planta hacia el controlador que es el encargado de tomar decisiones mediante programación basada en realimentación de estados para ejecutar el funcionamiento de la etapa de potencia, tomando en cuenta los parámetros de temperatura y tiempo de funcionamiento configurados por el usuario previamente. Mediante la caracterización de la planta se logra obtener su curva característica como respuesta ante una entrada rampa y de esta manera linealizar sus secciones o rangos de trabajo, para poder implementar el controlador en espacio de estados según los requerimientos de la empresa.

Palabras clave: Control Automático, HMI, Función de Transferencia, Espacio de Estados, Linealización.

ABSTRACT

The present technical project was developed in the company MALEMEC SA, which is located in the Beaterio sector south of Quito, in the area of industrial electric furnaces, with the aim of optimizing the time of use and reducing the payment of the supply of electric power, the industrial electric furnace is a work tool that is used to perform the curing or drying process of the varnish that is applied to the windings of the electric machines (motors, generators and transformers). In order to obtain the aforementioned benefits, the control and power elements were modified, in addition an HMI was implemented; that allows the control and supervision of the process of temperature control of the industrial electric furnace. The temperature sensor (thermocouple) sends the data obtained from the plant to the controller, which is responsible for taking decisions by programming based on state feedback to execute the operation of the power stage, taking into account temperature and time parameters of operation previously configured by the user. Through the characterization of the plant it is possible to obtain its characteristic curve as a response to a ramp input and thus linearize its sections or work ranges, in order to implement the controller in the state space according to the requirements of the company.

Keywords: Automatic Control, HMI, Transfer Function, Statespace, Linearization.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de curado o mejor conocido como secado de bobinado de las máquinas eléctricas después del rebobinado, se utiliza el horno eléctrico industrial para entrega energía en forma de calor a los bobinados y poder secar el barniz aplicado en las bobinas, la configuración de su temperatura se lo realiza de acuerdo al tipo de barniz (resina) que se aplique. Para lograr un control efectivo y eficiente se realiza este proyecto técnico de titulación, el cual se lo ha dividido por capítulos de la siguiente manera:

En el capítulo uno, se describe el problema de estudio, la justificación del problema de estudio, objetivos y metodología, de esta forma se obtiene la base para el presente proyecto.

El capítulo dos, se detalla la ubicación de la empresa, así como también el servicio que brinda; por otro lado, se conoce los conceptos generales relacionados al proyecto, estudio de proyectos similares implementados en diferentes empresas, y por último, se estudia los procesos de modelamiento y simulación que tienen relación con el proyecto a implementar.

En el capítulo tres, se describe el proyecto a nivel de hardware y software, especificando la ubicación de los sensores y actuadores; además el diseño de control del horno eléctrico industrial para el proceso de curación o secado de barniz (resina) de las máquinas eléctricas, además se detalla las secciones de linealización del nuevo controlador con sus respectivas curvas de simulación e implementación.

En el capítulo cuatro, se compara resultados obtenidos mediante la simulación con la implementación del controlador basado en espacio de estados del horno eléctrico industrial (planta), por medio de los parámetros principales que se caracteriza un sistema de control.

Por último, en anexos, se detalla toda la información necesaria de soporte enciclopédico relacionada con el presente proyecto técnico.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En el capítulo 1, se describe el problema de estudio, justificación, los objetivos que se desean cumplir con la realización correcta del proyecto y, finalmente, los beneficiarios directos con la ejecución del proyecto.

1.1 Problema de estudio

La Empresa MALEMEC S.A. fundada en el año de 2007 y ubicada actualmente en el sur de Quito, brinda servicios de mantenimiento y reparación electromecánica de máquinas eléctricas como: generadores, motores y transformadores.

La Empresa MALEMEC S.A. posee un horno eléctrico industrial el cual se lo utiliza para el secado y desprendimiento del barniz en bobinados de máquinas eléctricas industriales; sin embargo, este artefacto no es totalmente eficaz al momento de su utilización, ¿Cómo afecta el bajo rendimiento del horno eléctrico, que se lo utiliza para el secado o curado del barniz de los bobinados de las máquinas eléctricas, en la Empresa MALEMEC S.A.?

En el desarrollo del proceso industrial en las etapas de secado y desprendimiento de barniz de los rotores y estatores de las máquinas eléctricas en la Empresa MALEMEC S.A., no se cuenta con un sistema de control automático de temperatura del horno eléctrico industrial para el tratamiento requerido sobre el barniz de las máquinas eléctricas, esto hace que los operarios inviertan de manera equivocada el tiempo de trabajo para el control manual del horno eléctrico y para la supervisión constante del proceso de secado, haciendo que el rendimiento no sea el correcto y a su vez produciendo menor productividad para la empresa.

1.2 Justificación

Los seres humanos tienden a disminuir su eficiencia al momento de realizar procesos repetitivos durante periodos de tiempo extensos, por esta razón se produce errores o desperfectos dentro de su trabajo. La automatización de máquinas o dispositivos ha mejorado considerablemente la eficiencia de los procesos dentro de la industria; mejorando de esta manera la calidad final del producto y disminuyendo riesgos al personal laboral.

El fin de automatizar el horno eléctrico para secado de bobinas en la Empresa MALEMEC S.A. es mejorar el rendimiento del trabajo, disminuyendo los tiempos innecesarios que él o los operadores toman para inspeccionar el estado de secado y/o desprendimiento del barniz sobre las bobinas introducidas en el horno eléctrico industrial, de esta manera se ahorra tiempo el cual puede ser utilizado para realizar otro proceso.

Con la variedad de productos y servicios que ofrece el mercado eléctrico y electrónico de tipo industrial se puede fabricar un dispositivo que elimine los problemas que contiene el horno actual, como son: la supervisión manual del funcionamiento del horno y el riesgo que conlleva manipular mientras está en funcionamiento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un HMI para el control del proceso de temperatura con espacio de estados en la empresa MALEMEC S.A.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la planta para obtener el modelo matemático del proceso de temperatura.
- Diseñar un controlador en espacio de estados para el controlador de proceso de temperatura.
- Implementar el controlador en espacio de estado para el control de proceso de temperatura.
- Simular el comportamiento del control de proceso de temperatura.
- Contrastar el desempeño del control de proceso de temperatura simulado vs. el implementado.

1.4 Beneficiarios

El beneficiario del presente proyecto es la Empresa MALEMEC S.A. encabezado por el señor Hugo Cevallos, Gerente General de la Empresa, mediante la realización del proyecto de la automatización del horno eléctrico industrial para el secado y desprendimiento de barniz en los bobinados, se tiene un control de temperatura bastante precisa, además de disminuir el tiempo de secado.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El capítulo 2 se describe la ubicación y servicio que brinda la empresa, conceptos generales relacionados al proyecto, estudio de proyectos similares implementados en diferentes empresas, por último, se estudia los procesos de modelamiento y simulación que tienen relación con el proyecto a implementar.

2.1 Empresa MALEMEC S.A.

La Empresa MALEMEC S.A. esta ubicada en la ciudadela Argentina, calle General Julio Andrade E1 - 125 y calle E1C, sector El Beaterio, Provincia de Pichincha como se muestra en la Figura 2.1, la empresa ofrece servicio de mantenimiento y rebobinado de máquinas eléctricas de media y alta tensión con calidad y experiencia de técnicos especializados con más de 20 años, además están en la capacidad de ofrecer su servicio por todo el territorio nacional.

Figura 2.1 Ubicación Empresa MALEMEC S.A.



Ubicación de la empresa MALEMEC S.A. Fuente: (Google Maps, 2017)

La misión de la empresa es brindar a los clientes servicios de ingeniería en mantenimiento eléctrico y mecánico de equipos de media y alta tensión; además comprobar el correcto funcionamiento sometiendo los equipos a pruebas eléctricas, de esta manera se puede prolongar la vida útil de los equipos.

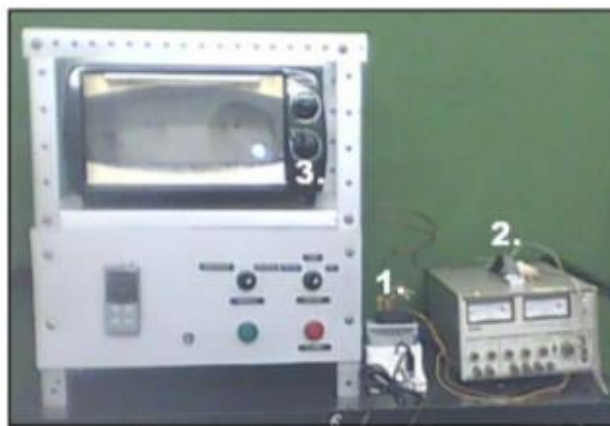
2.2 Proyectos similares

Como primer proyecto se presenta el estudio del modelamiento y control digital de temperatura para un horno eléctrico de menor escala para lo cual se analiza sistemas térmicos y se requiere conocimientos físicos previos en áreas como termodinámica, fluidos y física en general, ya que el sistema térmico puede modelarse a través de ecuaciones matemáticas sin importar la linealidad de la planta. (Khalil, 2002)

Cuando se trabaja con variables, como temperatura, los efectos no lineales más comunes son los tiempos de retardo y la saturación, por estos inconvenientes en la mayoría de los casos es necesario realizar aproximaciones a sistemas lineales que permitan usar la teoría de estos sistemas; esto se desarrolla con la linealización del sistema basado en un punto de equilibrio pre-establecido. (Flores, 2009)

Para agilizar el análisis del comportamiento del sistema basado en un punto de equilibrio, y obtener acciones de control sencillas, es necesario aplicar la linealización de los sistemas térmicos en diferentes rangos o secciones de operación. Existe un sinnúmero de sistemas térmicos a nivel industrial que pueden ser controlados a través de diferentes acciones de control. En la Figura 2.2, se observa el hardware utilizado para el proyecto “Modelamiento y control digital de temperatura para horno eléctrico”.

Figura 2.2 Horno eléctrico monofásico



1) Controlador, 2) Fuente de alimentación, 3) Horno eléctrico. Fuente: (Reyes & Montaña, 2010)

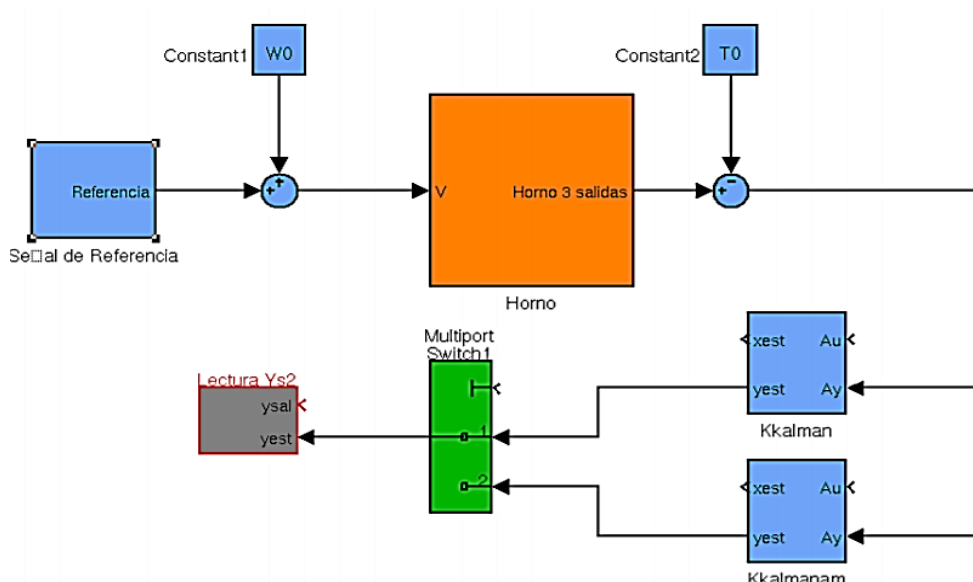
La primera acción de control es obtener el modelo más próximo del horno eléctrico o planta, se puede escoger entre varias técnicas de control dependiendo del sistema que se va a controlar; por ejemplo, para sistemas térmicos las acciones de control más comunes son el controlador PID y control ON/OFF, pero existen otras estrategias como control polinomial RST y control por realimentación de estados. (Scenna, 1999)

La función de transferencia y el control digital de temperatura para el horno eléctrico tiene como objetivo la modelación tomando en cuenta los efectos no lineales que presenta y como se decía anteriormente definiendo las regiones de linealización de los puntos de equilibrio de la planta, con el fin de llegar a un modelo aproximado del sistema y posteriormente aplicar el control. (Egea & Sarmiento, 2009)

Como segundo proyecto, describe la implementación de una plataforma multivariable que interpreta las características de un horno eléctrico industrial, se describe la metodología de identificación realizada y se presentan los resultados de los experimentos preliminares hechos. En la Figura 2.3, se observa el algoritmo clave para el desarrollo del filtro de Kalman que necesita el proyecto “Diseño, identificación y control de un prototipo de horno continuo”, realizado en la Universidad Politécnica de Valencia.

El control por realimentación del estado estará basado en el diseño de un regulador cuadrático lineal o LQR (Linear Quadratic Regulator), este tipo de control parte del valor del estado y obtendrá la acción de control necesaria para desechar el error que pueda existir entre la salida y el modelo de referencia de la planta.

Figura 2.3 Implementación del filtro de Kalman en Simulink.



Salida real de la señal implementando el filtro de Kalman. Fuente: (Excrivá, 2010)

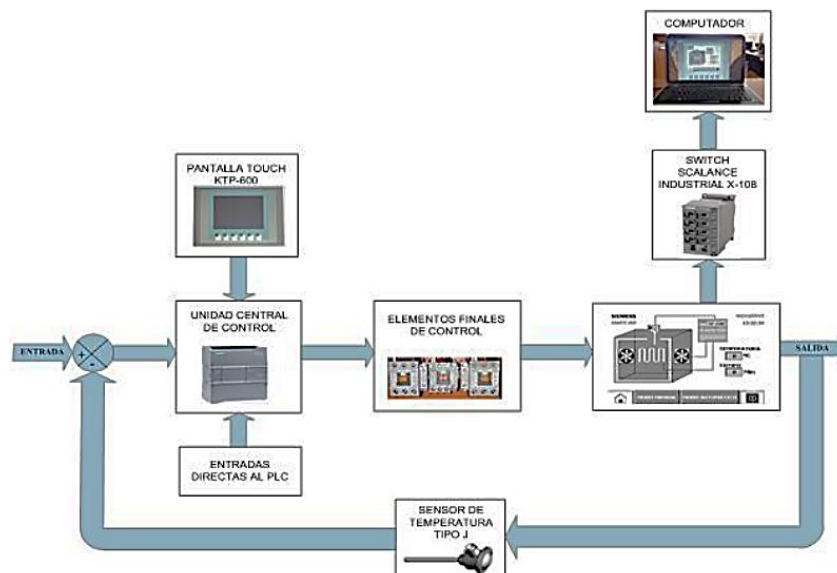
Para el diseño del controlador es necesario representar el modelo en función de transferencia para posteriormente pasarlo a espacio de estado; esto se obtiene a partir del modelo de entrada y salida de la planta. Esto se consigue con la función ss de MATLAB®: $[A, B, C, D] = ss(\text{modelo})$.

El resultado obtenido para $G1(s)$ tendrá 36 estados, es decir, el cálculo del controlador por realimentación se dificulta, para solucionar este inconveniente se ha llevado a cabo una reducción del orden del sistema, para actuar sobre el sistema real y de esta forma controlarlo; se diseñó un observador basado en el filtro de Kalman que pueda analizar todas las variables de estado del sistema de orden reducido. (Excrivá, 2010)

Como último proyecto es la implementación de la estructura de un horno eléctrico para el desprendimiento de barniz en máquinas eléctricas, como se observa en la Figura 2.4, el comportamiento de la planta en diagrama de bloques. Un factor muy importante es la potencia total del horno que resulta del cálculo de la cantidad de calor absorbido por la carga en un determinado tiempo y de las pérdidas de calor que se tienen por radiación, convección y conducción en las paredes.

Para controlar la temperatura interna del horno se realiza un control PID que permite mantener el valor de temperatura constante, mediante la utilización de un PLC (Controlador Lógico Programable) que controla el funcionamiento del sistema. (Flores Medina, 2016)

Figura 2.4 Implementación de horno eléctrico industrial



Implementación de horno eléctrico industrial control PID. Fuente: (Flores Medina, 2016)

Además, se incorpora un Interfaz Hombre-Máquina o HMI, donde se ingresan los valores de temperatura de secado y tiempo de funcionamiento. También se visualiza el estado de los elementos de control, el valor de temperatura real, el tiempo de funcionamiento transcurrido y un registro de alarmas de fallas producidas.

2.3 Espacio de estados

Espacio de estados se denomina, a un espacio cualquiera de n dimensiones en el cual los eje coordenados radican en el eje x_1 , el eje x_2, \dots , en el x_n . Se puede mencionar que cualquier punto puede representar a cualquier estado en el espacio de estado. (Ogata, 2010)

Otro concepto que se puede mencionar, es que el espacio vectorial donde el vector de estado toma valores se llama espacio de estado. Se debe tomar en cuenta que el vector de estado tendría la misma dimensión que la cantidad de elementos que tenga el vector. (Domínguez, 2006)

2.3.1 Variables de estado

Se puede mencionar que las variables de estado son aquellas que componen el conjunto de menor tamaño de variables que establecen el estado de un sistema dinámico.

Para describir de forma completa el comportamiento de un sistema de orden n , se necesita por lo menos n variables x_1, x_2, \dots, x_n que puedan describir la forma en la que se comporta el sistema con el mismo orden. Es decir, el conjunto de variables de estado con las n variables. (UNER, 2017)

Cuando las variables de estado se unen en el denominado “vector de estado” y a la vez el espacio n -dimensional que establece lo que pueden ser valores de esas variables, entonces se denomina espacio de estados. (Rodríguez & Bordóns, 2005)

2.3.2 Ecuaciones de espacio de estado

Lo primordial para el estudio en espacio de estados es concentrar el análisis en los tres tipos de variables que influyen en el modelado de los sistemas dinámicos.

- Variables de entrada
- Variables de salida
- Variables de estado

Uno de los principales beneficios de la representación en espacio de estados es que mediante su modelado se logra representar sistemas lineales o no lineales, continuos o discretos y se puede usar generalmente en notación matricial (UNER, 2017)

La representación de las ecuaciones son de primer orden las cuales operan sobre vectores de estado:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad \text{Ec. (2.2)}$$

u: vector que contiene cada una de las **p** entradas al sistema.

y: vector que contiene cada una de las **q** salidas del sistema.

x: vector que contiene cada una de las **n** variables de estado del sistema. (Turmero, 2015). Es decir:

$$u = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad u = \begin{bmatrix} y \\ y_2 \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix}_{q \times 1} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix}_{p \times 1} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

2.4 Modelamiento

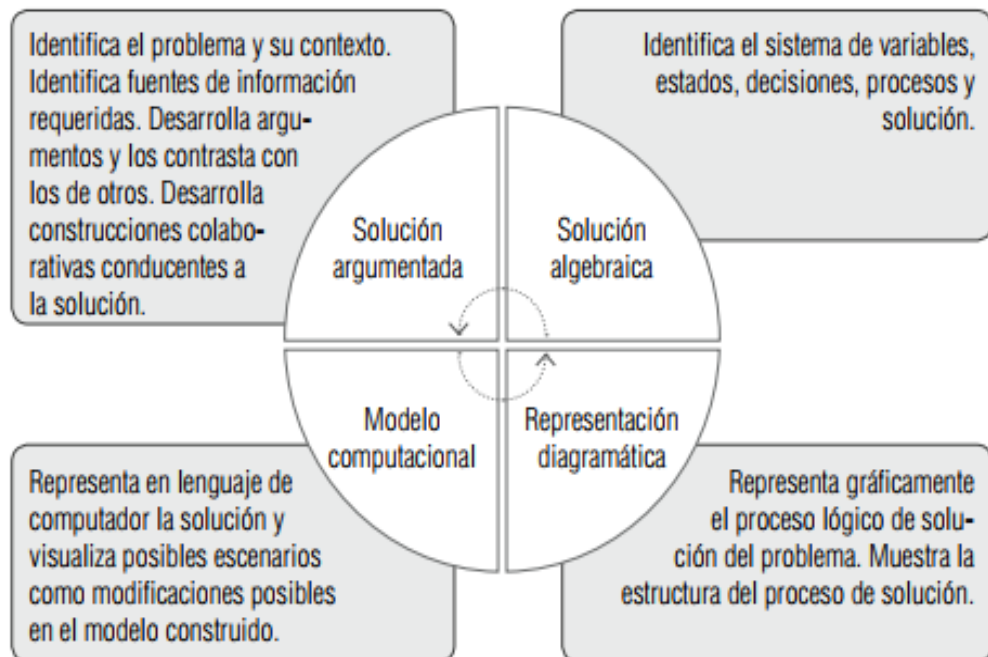
El principal objetivo del modelado es mejorar tanto el conocimiento como la comprensión de un proceso, con lo cual se ve en la necesidad de enfocar su estudio en como interaccionan entre si las partes de un sistema y a la vez el estudio del sistema como un todo, como se observa en la Figura 2.5. Según este punto de vista se puede mencionar dos grandes elementos conceptuales importantes en la interpretación de modelamiento:

- Un formalismo: Se puede mencionar que es un aparato matemático con unas reglas operativas para calcular.
- Una interpretación: Se puede decir que es una ontología, en estrecha relación con el formalismo, la cual es una representación de la imagen de los fenómenos, de procesos y del mundo que la teoría intenta explicar o describir.

Mediante el modelado se puede, a nivel de teoría realizar un acercamiento del formalismo científico hacia su interpretación, con el objetivo de poder describir, explicar y comprender los sistemas estudiados. Es decir, realizar una representación matemática de un sistema (Favio, 2017)

Entonces, el modelamiento parte de un sistema netamente real y lo transforma en fórmulas o patrones en donde los resultados no cambian demasiado con respecto a la realidad antes ya conocida. (Arboleda, 2012)

Figura 2.5 Representación múltiple de modelamiento



Sistema de representación múltiple para la formación de la competencia de modelamiento. Fuente: (Arboleda, 2012)

2.5 Simulación

El proceso de proyectar un modelo computacional de cualquier sistema real y a través de este modelo realizar experimentos con el objetivo de comprender su comportamiento y poder evaluar técnicas para su operación, se denomina simulación. Es decir, el término simulación se puede comprender como un proceso extenso el cual abarca no solo la construcción de un modelo, sino también un método experimental el cual busca:

- La descripción del comportamiento del sistema.
- La construcción de hipótesis y teorías considerando las observaciones realizadas.
- El uso del modelo para predecir el comportamiento futuro, es decir, las consecuencias producidas por variaciones en el sistema o por los métodos aplicados durante su operación. (PARAGON, 2015)

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se describe el proyecto a nivel de hardware y software, especificando la ubicación de los sensores y actuadores, además el diseño de control y HMI del horno eléctrico industrial para el proceso de secado o desprendimiento de barniz de las máquinas eléctricas.

3.1 Descripción del hardware

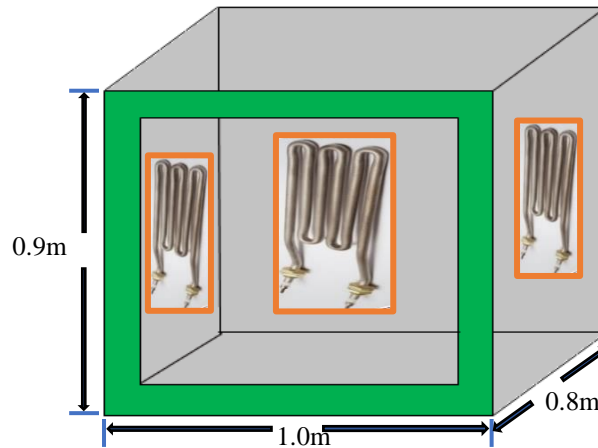
El horno eléctrico en el cual se realizará el control, perteneciente a la empresa MALEMEC S.A consta de la siguiente estructura:

- **Parte metálica:** Es el esqueleto metálico del horno el cual se encarga de sujetar todos los componentes del horno. En esta estructura se le montan los accesorios adicionales con que se decida equipar al horno, como puertas, bisagras, marcos, niquelinas, y sensores. Está parte este fabricado por con su estructura metálica de tol negro de 0.7 milímetros (mm) y tubo rectangular de $1\frac{1}{4}$ pulgadas (in).
- **Fibra de vidrio:** Este material es usado como aislamiento térmico para controlar la transferencia de calor, temperatura, energía y retardar el enfriamiento. Se encuentra colocado en las 5 caras del horno, incluyendo la parte de la muestra del mismo.
- **Fibra cerámica:** Es una fibra refractaria o conocido como material aislante, esta fibra tiene la característica de baja conductividad térmica, de esta manera el calor generado en la cara de trabajo se refleja aproximadamente un 65 %.
- **Resistencias eléctricas (niquelinas):** encargadas de emitir calor adecuado en el interior del horno (subir o bajar la temperatura) con las necesidades de los bobinados y la potencia de las mismas, la cual es de 1000 w, $18,6\ \Omega$ y 14,6 A por fase.
- **Termocupla:** es la encargada de sensar la temperatura en tiempo real en el interior del horno y a su vez permite establecer un valor deseado mediante un control. Esta termocupla es de tipo k.

En la parte exterior se encuentra un panel de control, el cual consta de contactores, un timer para seleccionar el tiempo de funcionamiento del horno y una serie de pulsadores

y que realizan el tipo de control on/off con el que cuenta la empresa. A continuación, en la Figura 3.1 se puede visualizar las dimensiones del horno eléctrico industrial.

Figura 3.1 Dimensiones horno industrial eléctrico



Dimensiones respecto a los tres ejes x, y, z del horno eléctrico industrial. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

3.2 Funcionamiento del horno eléctrico industrial

El proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial comienza cuando el operador esta por aplicar el barniz sobre la superficie del estator o rotor que se desea secar, en paralelo se debe precalentar el horno a temperatura establecida por las hojas de especificaciones del tipo de barniz que se va a aplicar.

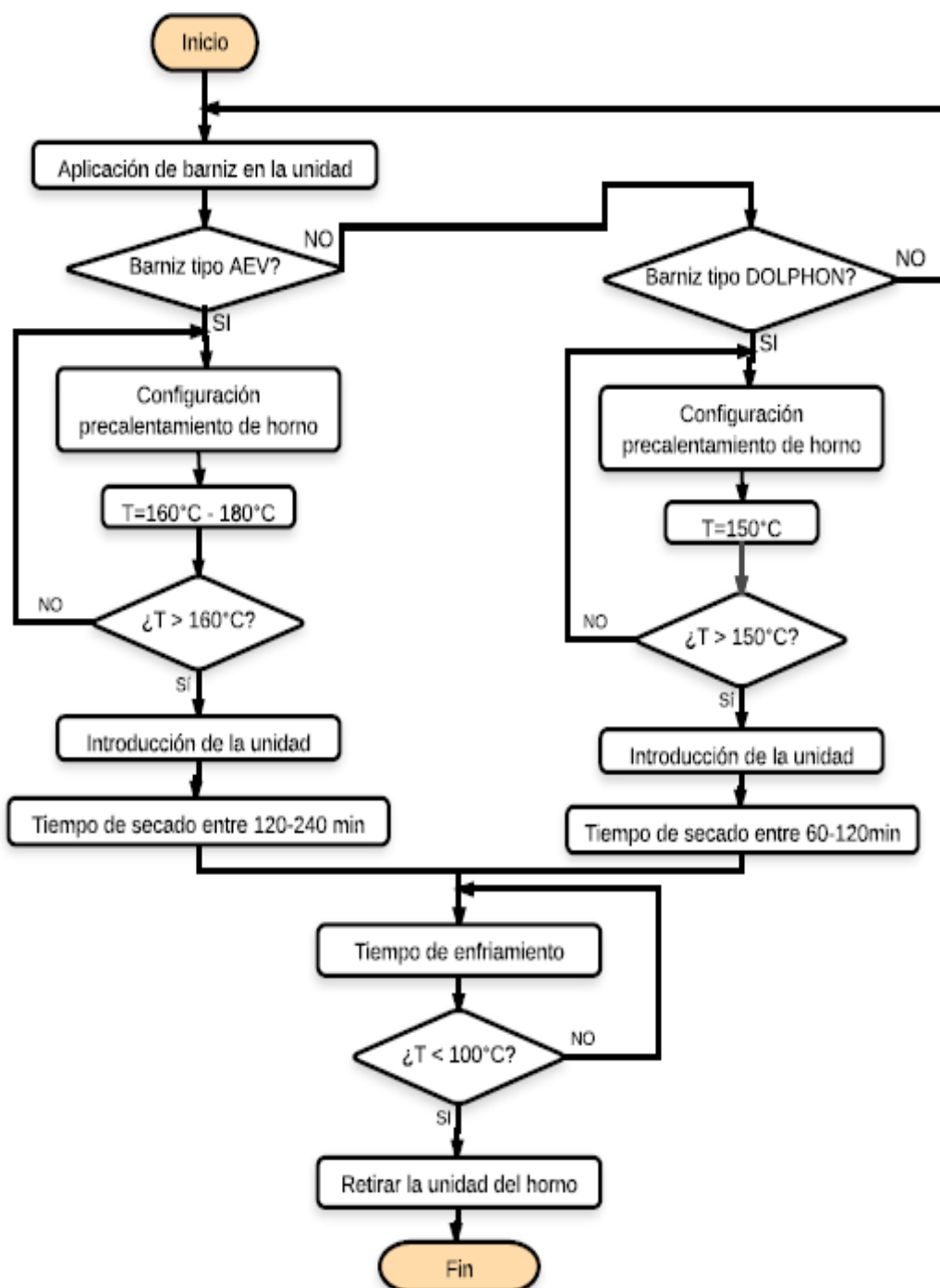
Si el barniz que se aplica es del tipo AEV ULTIMEG 2000/380, el tiempo de curado o secado está entre 2 a 4 horas como indica el Anexo 1. En cambio, si se aplica el barniz de tipo DOLPHON CC-1105 el tiempo de curado esta entre 1hora con 50 minutos y 2 horas con 20 minutos como indica el Anexo 2.

Después de que el horno obtenga la temperatura deseada se introduce en este los elementos que fueron cubiertos de barniz, ya sean estos estatores o rotores, se cierra la puerta del horno y se espera el tiempo que se establece en los Anexos 1 y 2.

Finalizando el tiempo de secado se deja enfriar el horno eléctrico industrial, cuando el horno alcance una temperatura cercana a 50 °C se puede retirar el elemento (estator o rotor) del interior del horno eléctrico industrial y de esta forma está listo para continuar con el siguiente proceso.

De acuerdo al proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial, y los diferentes tipos de resinas que se utiliza, el proceso se lo representa mediante el flujograma que se encuentra en la Figura 3.2.

Figura 3.2 Flujo de procesos horno industrial eléctrico

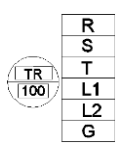
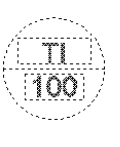
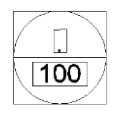
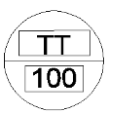



Flujo de procesos del horno eléctrico industrial actual de la empresa MALEMEC S.A. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogaes

3.2.2 Plano de Instrumentación

El plano de instrumentación recolecta todos los flujos de procesos en las tuberías y los equipos de instalados de la planta, este plano se utiliza al momento de realizar algún cambio o mantenimiento físico de la planta que en este caso es el horno eléctrico industrial. Los elementos que consta la planta se muestran en la Tabla 3.1.

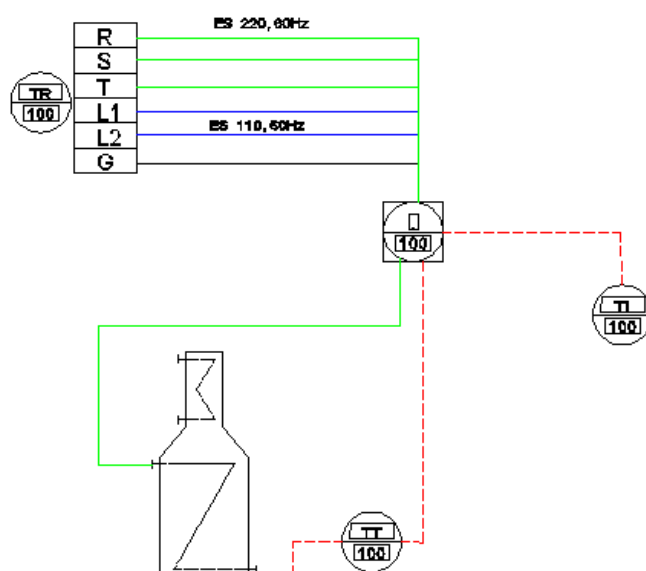
Tabla 3.1 Simbología del plano de instrumentación

| Símbolo | Descripción | Símbolo | Descripción |
|--|--|---|--|
|  | Suministro eléctrico (Trifásico y monofásico) |  | Indicador de Temperatura del Termopar |
|  | Tablero de operación |  | Transmisor de Temperatura (Termopar) |
|  | Horno Eléctrico | | |

Descripción del plano de instrumentación. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Los elementos de control y de potencia de la planta trabajan con red monofásica y trifásica, la termocupla es el elemento fundamental para el control de la planta, en la Figura 3.3 se muestra el plano de instrumentación con su respectiva conexión.

Figura 3.3 Plano de instrumentación



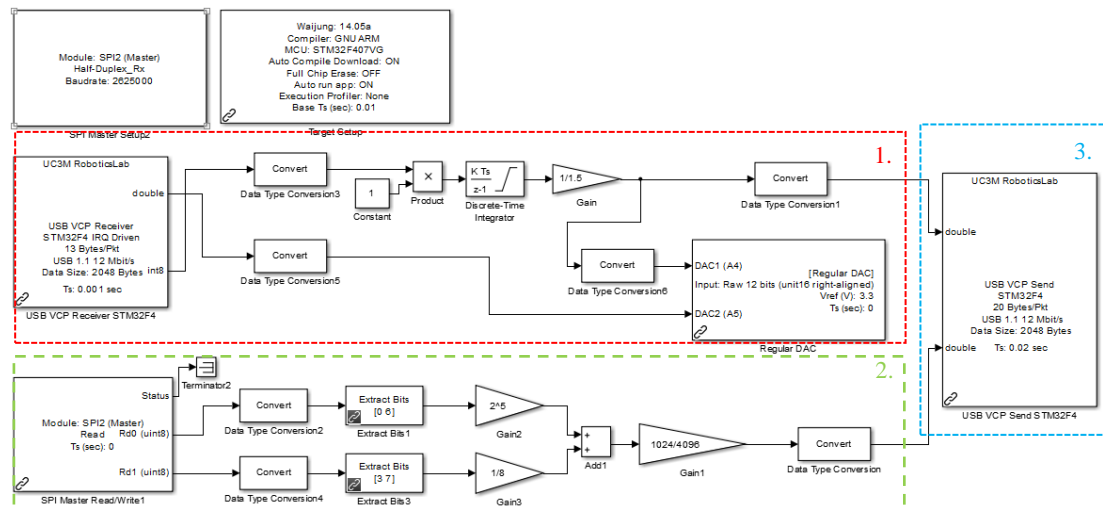
Plano de instrumentación del horno eléctrico industrial actual de la Empresa MALEMEC S.A.
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

3.3 Caracterización de la planta

Para el análisis de la linealidad de la planta se hace énfasis en el estudio del proceso de calentamiento del horno eléctrico, realizando pruebas y obteniendo datos, partiendo de temperatura inicial (temperatura ambiente) hasta una temperatura máxima 250 °C, que las resistencias eléctricas del horno puedan suministrar para la realización del proceso de secado y desprendimiento de barniz en los bobinados. Mediante los datos obtenidos y la gráfica de la respuesta de la planta a la variación de corriente en las niquelinas, permiten identificar las zonas lineales las cuales serán de gran ayuda para obtener un diseño eficiente del sistema de control.

Para caracterizar el sistema fue preciso implementar un procedimiento para identificar el comportamiento de la misma y observar su respuesta frente a la variación de la entrada de la planta. Por este motivo se decidió el uso de una rampa con la cual se pueda observar cómo se comporta el sistema frente al valor configurado en su entrada.

Figura 3.4 Programa en Matlab para adquisición de datos

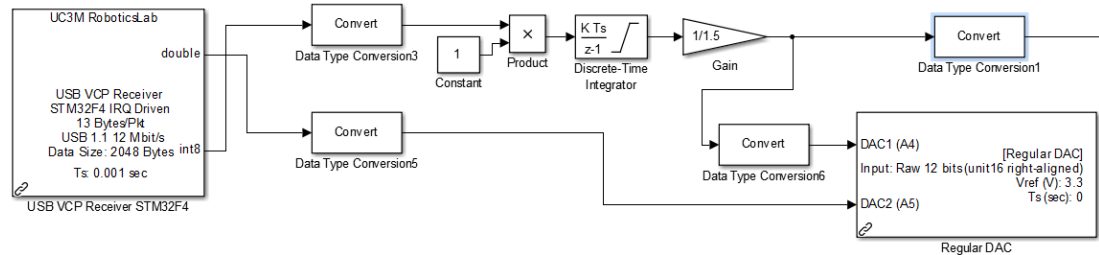


Programa en Simulink de MATLAB para adquisición de datos de la planta. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Figura 3.4 se observan 3 secciones que componen el programa para la adquisición de datos de la planta, el cual nos permite identificar cómo se comporta el horno eléctrico industrial de acuerdo a su entrada. En la primera sección se configura el tiempo en el que varía la temperatura de la gráfica, en la Figura 3.5 se muestra el algoritmo; el bloque de regulador DAC es el encargado de controlar la etapa de potencia, mediante la variación de voltaje (0-3 V) y la entrada DAC2 se utiliza para hacer pruebas de variación de voltaje en la salida del DAC mediante potenciómetro,

mientras que la entrada DAC1 se utiliza de acuerdo al paso se le configure por el usuario.

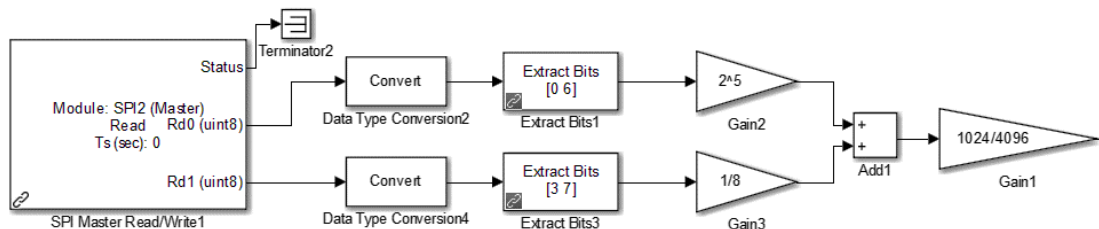
Figura 3.5 Bloque para obtención del tiempo



Programa en Simulink de MATLAB para la obtención del tiempo. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

La segunda parte no es más que la obtención del dato de la temperatura que entrega la termocupla tipo k , en este caso se realizadas operaciones matemáticas para obtener solamente los bits que contienen la información el módulo MAX 6675.

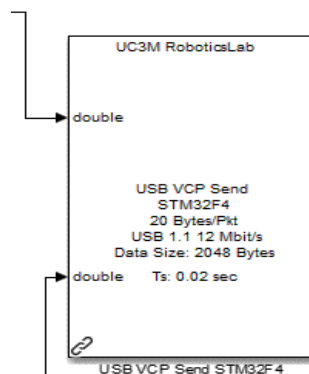
Figura 3.6 Bloque para obtención de la temperatura



Programa en Simulink de MATLAB para la obtención de la temperatura. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Por último, se envía los dos datos anteriores al bloque USB de la STM Discovery, el cual lo va a procesar para obtener la gráfica deseada.

Figura 3.7 Bloque para configurar el puerto USB



Bloque para la configuración del puerto USB 1.1 de la tarjeta STM Discovery. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Se analiza tres rangos o secciones claves para la linealización de la planta, se toman estos rangos por la temperatura normalizada del tipo de barniz que se utilice, también depende de las aplicaciones del horno eléctrico industrial (planta); como por ejemplo la recuperación de aislación en los estatores, para esta aplicación el horno eléctrico industrial debe alcanzar temperaturas moderadas.

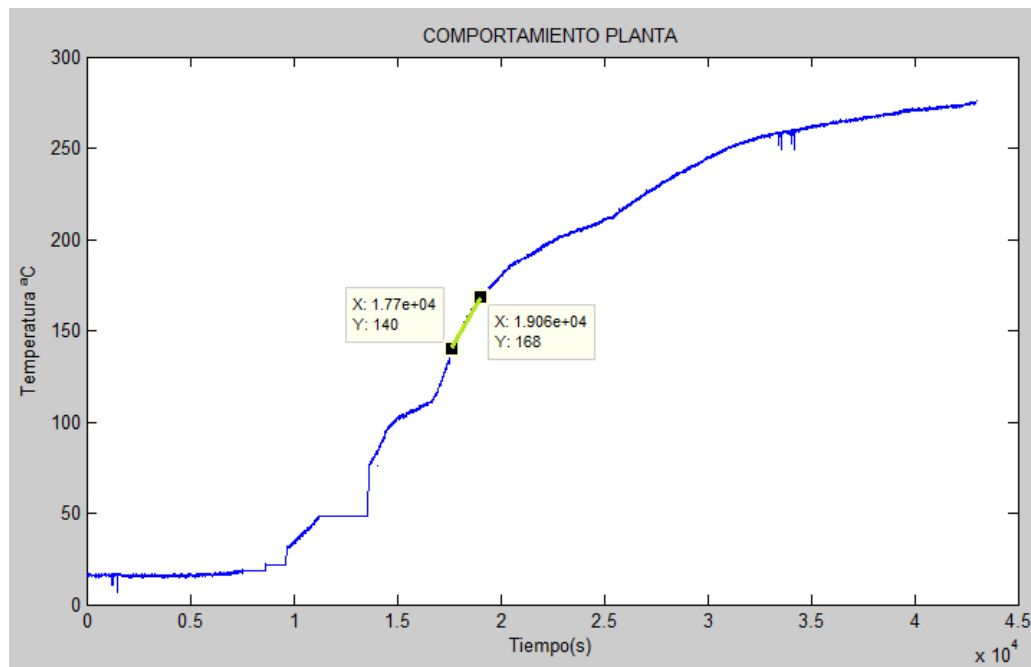
3.3.1 Secciones de linealización

El primer rango o sección de linealización varía desde 140 °C hasta 168 °C, esta es la temperatura adecuada para recuperar la aislación del bobinado, se modifica de acuerdo a los caballos de fuerza o HP de un motor.

En la Figura 3.8, se observa la recta en color verde que pasa por dos puntos en la gráfica del comportamiento de la planta, se escoge de esta manera por la razón que cubre por casi toda la curva de la sección o sector seleccionado.

Los puntos tanto en el eje (x) como en el eje (y), son utilizados para obtener la ecuación de la recta y por ende la pendiente, en unidades correspondientes a la ganancia (k).

Figura 3.8 Primera sección de linealización

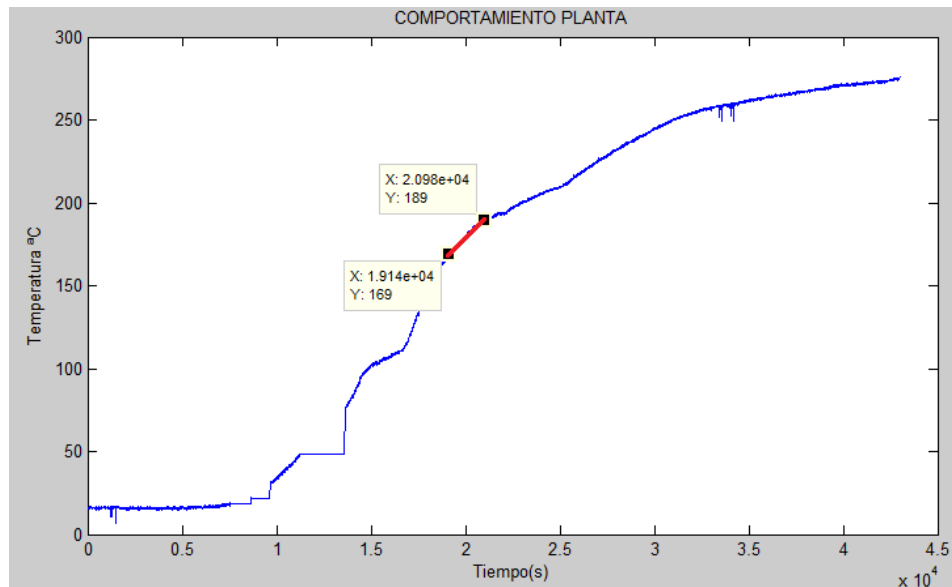


Sección de linealización recomendada para recuperar la aislación de las bobinas de los motores.
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El segundo rango o sección de linealización varía desde 169 °C hasta 189 °C, este es el rango para realizar el proceso de curación con el barniz DOLPHON CC-1105.

En la Figura 3.9, se observa la recta en color rojo que pasa por los dos puntos de la gráfica que representa del comportamiento de la planta.

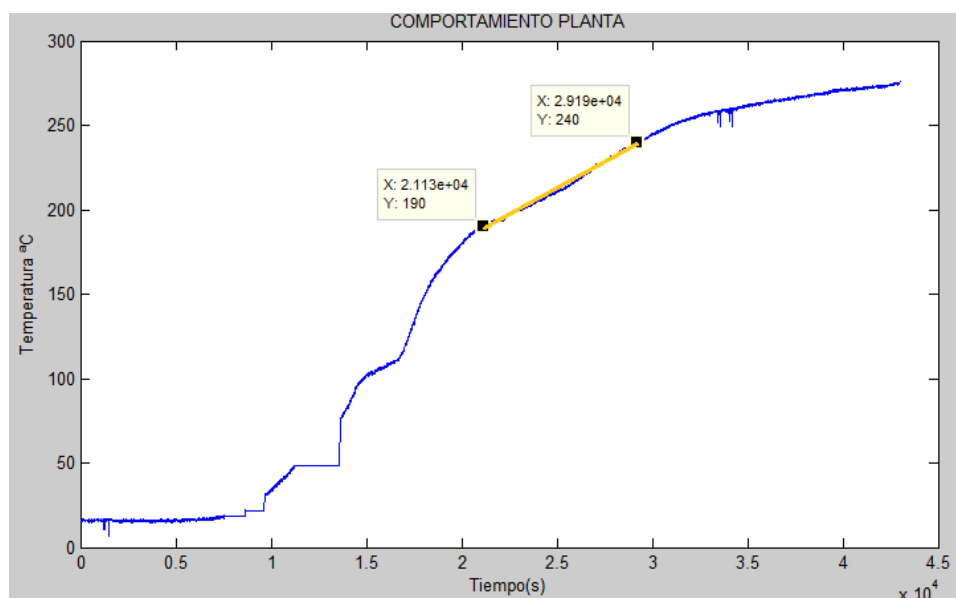
Figura 3.9 Segunda sección de linealización



Sección de linealización recomendada para el proceso de curado de barniz DOLPHON CC-1105.
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El tercer rango o sección de linealización varía desde 190 °C hasta 240 °C, este es el rango adecuado para realizar el proceso de curación con el barniz AEV ULTIMEG 2000/380. En la Figura 3.10, se observa la recta en color amarillo que pasa por los dos puntos de la gráfica del comportamiento de la planta.

Figura 3.10 Tercera sección de linealización



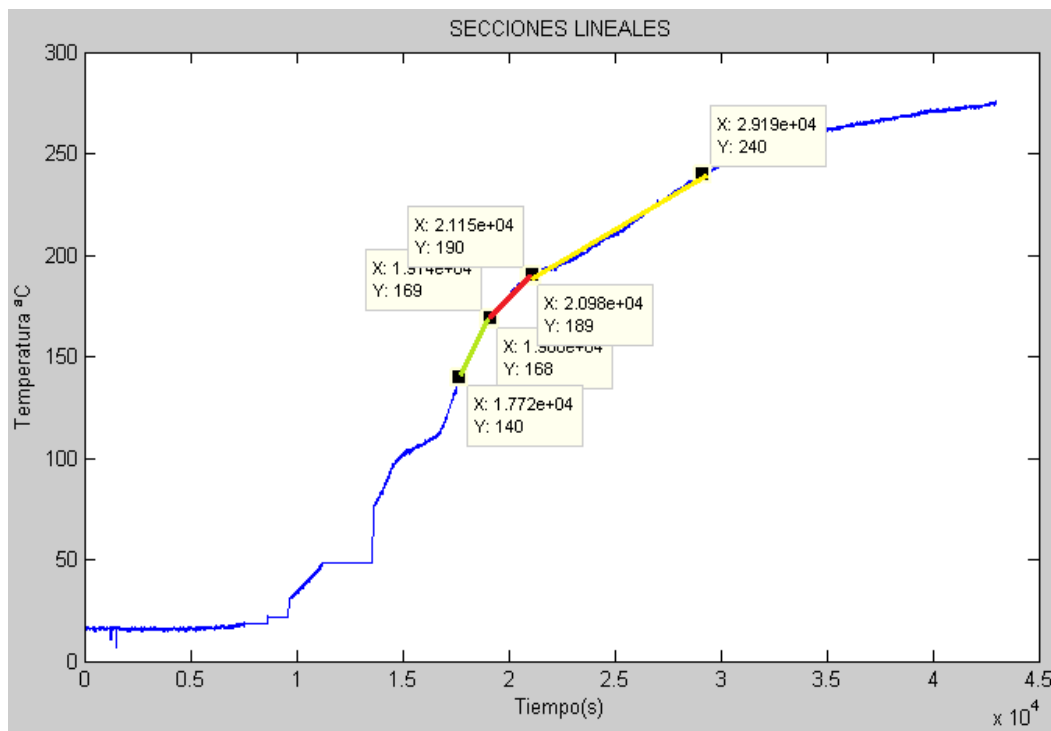
Sección de linealización recomendada para el proceso de curado de barniz AEV ULTIMEG 2000/380.
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Los tres sectores detectados son de gran importancia para la obtención del modelo matemático y además para la implementación del controlador.

3.4 Modelo matemático

Partiendo de las zonas lineales obtenidas mediante la respuesta del sistema a una entrada como se puede observar en la Figura 3.11, se calcula el modelo matemático de cada una de las tres secciones lineales representadas gráficamente mediante una recta.

Figura 3.11 Secciones lineales del comportamiento de la planta



Identificación de las rectas que señalan las secciones lineales del comportamiento de la planta.
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Con cada una de las secciones lineales se calcula la ganancia y el valor donde se estabiliza la temperatura para obtener de esta manera la función de transferencia que representa a cada una de las secciones lineales. El cálculo del sistema se representa mediante la siguiente ecuación:

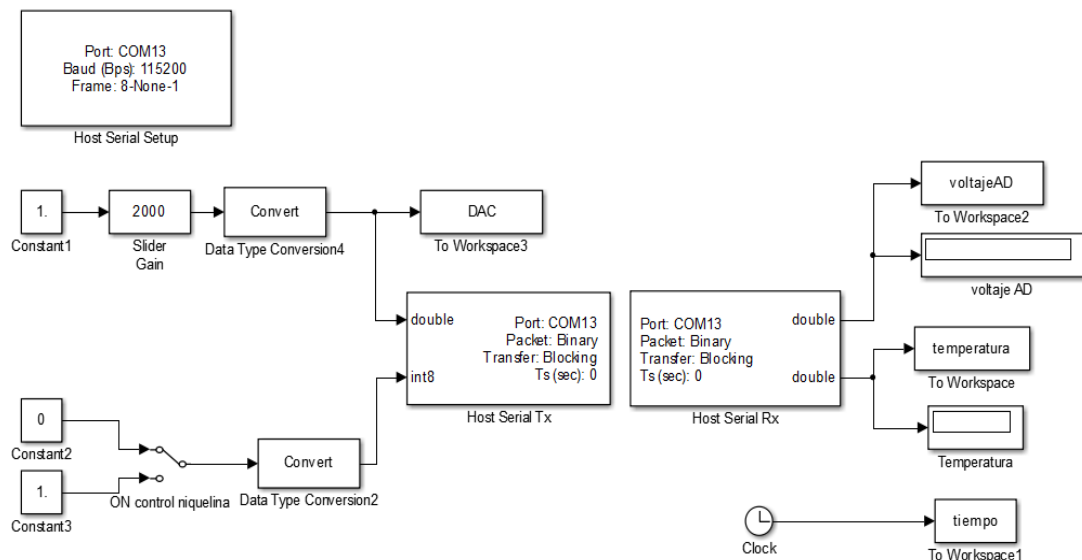
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

El cálculo de los parámetros ganancia (k) y la constante de tiempo (τ), que componen la función de transferencia representada mediante la ecuación (3.1) son indispensables para la obtención del modelo matemático.

Para la obtención de la constante de tiempo no basta con la prueba realizada mediante la respuesta del sistema a una entrada rampa, por lo cual es necesario determinar el tiempo de respuesta del sistema en un rango de operación del horno eléctrico industrial. Este procedimiento se lleva a cabo al tomar los datos de la respuesta de la planta a una entrada para una temperatura deseada, y a su vez validar estos datos de los tiempos correspondientes al 28,3 % y al 62,3 % del valor de temperatura cuando se encuentra en estado estable.

Para generar la entrada paso del sistema mediante la computadora se utiliza el siguiente programa realizado en MATLAB®, el cual establece el envío y recepción de datos la tarjeta STM32F407 Discovery hacia la computadora. La implementación de este programa se basa en la configuración de una entrada paso para verificar en que intervalo de tiempo se estabiliza la temperatura, para posterior encontrar los valores que corresponden a los porcentajes deseados y obtener la constante de tiempo y la ganancia correspondiente a la primera sección lineal de la planta.

Figura 3.12 Programa en Matlab para obtención de datos para el diseño del controlador del sistema



Programa para configuración de entrada paso del sistema y obtención de datos para cálculos de constante de tiempo. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Mediante un script en MATLAB® por el cual se representa la Figura 3.13, se realiza el cálculo de la ganancia, la constante de tiempo. Sin embargo, para la identificación de los intervalos de valores de tiempo al porcentaje de 28,3 % y 62,3 % se utiliza la gráfica obtenida de la primera sección lineal en respuesta a la entrada paso.

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_{63,2\%} - t_{28,3\%}) \quad \text{Ec. (3.2)}$$

$$k = \frac{\text{temperatura estable}}{\text{paso}} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

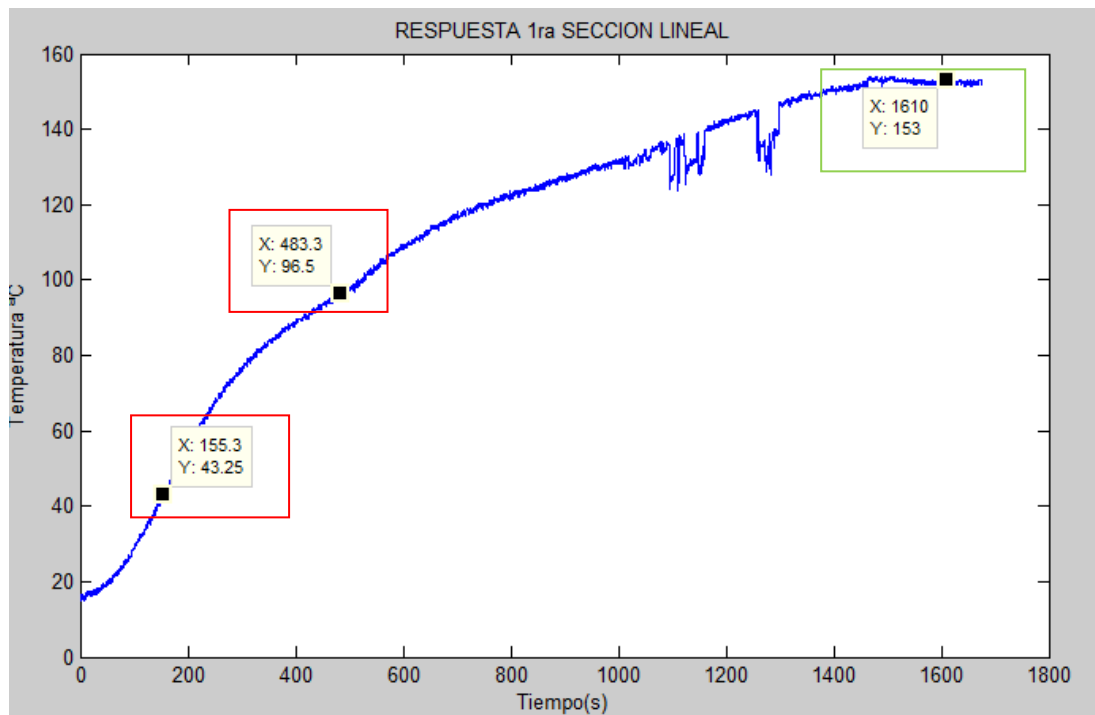
Los cálculos correspondientes a los datos obtenidos según la temperatura estable a 153 °C son el 96,696 % y 43,299 %.

Los cálculos son los siguientes:

$$t_{63,2\%} = 153 \times 0,632 = 96.696\% \quad ; \quad t_{28,3\%} = 153 \times 0,283 = 43.299\%$$

Para la obtención de los valores de tiempo correspondientes a los porcentajes $t_{63,2\%}$ y $t_{28,3\%}$ se los obtiene mediante la figura 3.13, donde se puede identificar que los valores de tiempo son $t_{63,2\%} = 483,3$ s y $t_{28,3\%} = 155,3$ s, además el valor donde la temperatura se estabiliza frente a la entrada paso a los 153 °C.

Figura 3.13 Respuesta de la primera sección lineal



Gráfica de la respuesta de la primera sección lineal a la entrada paso de 2000. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Aplicando las ecuaciones desde la 3.1 hasta la 3.3 y a partir de la identificación de los valores en los intervalos de tiempo correspondientes al porcentaje de 28,3 % y 62,3 %, se realiza el cálculo matemático para la obtención de los valores de la ganancia, constante de tiempo y por último la función de transferencia de primer orden que representa al modelo matemático de la primera sección lineal tomada de la respuesta a la entrada rampa de la planta.

Cálculo de la constante de tiempo:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_{62,3\%} - t_{28,3\%})$$

$$\tau = 492 \text{ s}$$

Cálculo de la ganancia:

$$k = \frac{\textit{temperatura estable}}{\textit{paso}}$$

$$k = 0,0765 \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\%DC} \right)$$

Función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

$$G(s) = \frac{0,0765}{492s + 1}$$

Mediante un script en MATLAB® cómo se observa en la Figura 3.14, se realiza el cálculo de los parámetros antes mencionados para obtener de manera directa los valores de la constante de tiempo y ganancia, para posteriormente la obtención modelo matemático de la primera sección lineal de la planta llamado ft_horno1.

Figura 3.14 Cálculos de valores de la función de transferencia

```

planta_horno_estados1.m* x
1 %%OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA%%
2 %%Cálculo de constantes%%
3 - s=tf('s');
4 - paso=2000;
5 - temp_estable=153;
6 - temp_63=temp_estable*0.632
7 - temp_28=temp_estable*0.283
8
9 %%
10 - t_63=483.3;
11 - t_28=155.3;
12
13 - tao=3*(t_63-t_28)/2
14 - k=temp_estable/paso
15
16 - ft_horno1=k/(tao*s+1)

```

Cálculos de la constante de tiempo y ganancia para obtener la función de transferencia de la primera sección lineal. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El uso del script en MATLAB® para obtener la función de transferencia correspondiente a la primera sección lineal, se lo repite para encontrar las funciones de transferencia de las dos secciones lineales restantes, los valores obtenidos se los puede observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de la función de transferencia de las secciones lineales restantes

| SECCIÓN LINEAL | CONSTANTE DE TIEMPO (τ) (s) | GANANCIA ($\frac{k}{\frac{Q_C}{\%DC}}$) | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA |
|----------------|------------------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | 492,00 | 0,0765 | $Y(s) = \frac{0,0765}{492s + 1}$ |
| 2 | 168,81 | 0,0864 | $Y(s) = \frac{0,0864}{168,8s + 1}$ |
| 3 | 222,39 | 0,0787 | $Y(s) = \frac{0,0787}{222,4s + 1}$ |

Cálculos de la constante de tiempo, ganancia y función de transferencia de las secciones lineales.

Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

3.5 Diseño de los controladores

Para la realización del controlador en espacio de estados es importante el cálculo adecuado de las constantes de modelo en espacio de estados (A, B, C, D), los cuales provienen de la representación del modelo matemático de cada sección lineal de la planta a través de la de la función de transferencia de primer orden de cada una de ella. Además, se debe precisar el valor de las ganancias de retroalimentación (Ka) y (Kb) para que el controlador cumpla eficientemente al estabilizar el valor de temperatura deseado por el usuario.

Según las funciones de transferencia de primer orden anteriormente obtenidas se puede realizar el cálculo de las constantes para representar en espacio de estados la misma, y de esta manera desarrollar el controlador través de las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{-1}{\tau} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

$$B = \frac{K}{\tau} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Para el cálculo de las constantes de realimentación las ecuaciones son las siguientes:

$$\varepsilon = \sqrt{\log(Mp) \left(\frac{1}{\log(Mp)^2 + \pi^2} \right)} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

$$Wn = \frac{4}{4 * ts} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$ka = \frac{Wn^2 * \tau}{k} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

$$kb = \frac{(2\varepsilon Wn * \tau) - 1}{k} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Mediante un segundo script en MATLAB® se realiza el cálculo de constantes en representación de espacio de estados y las constantes de realimentación para la primera sección lineal.

Figura 3.15 Cálculos de constantes del controlador

```
%% CONSTANTES ESPACIO DE ESTADOS

A=-1/tao
B=k/tao

%%
mp=1
ts=1700
aux=log(mp/100);

e=aux/sqrt((pi*pi)+(aux*aux));
e=abs(e)
wn=4/(e*ts)

ka=(wn*wn)*tao/k
kb=((2*e*tao*wn)-1)/k
```

Cálculos de la constante para espacio de estados y constantes de realimentación del controlador de la primera sección lineal. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El uso del script en MATLAB® para obtener las constantes de espacio de estados y realimentación del controlador de la primera sección lineal, se lo repite para encontrar las funciones de las secciones lineales restantes en base al tiempo de establecimiento y el máximo sobre impulso que cada una presenten. Los valores se pueden observar en la siguiente Tabla:

Tabla 3.3 Constantes para desarrollo del controlador

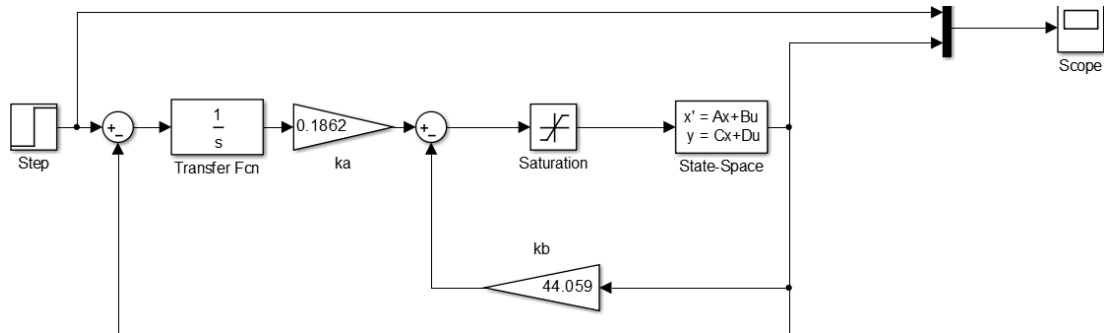
| SECCIÓN LINEAL | CONSTANTES ESPACIO DE ESTADOS | | | | Mp (%) | Ts (s) | ka | kb |
|----------------|-------------------------------|------------|---|---|--------|--------|--------|---------|
| | A | B | C | D | | | | |
| 1 | -0,0020 | 0,00015549 | 1 | 0 | 1 | 1000 | 0,1862 | 44,0959 |
| 2 | -0,0059 | 0,0005116 | 1 | 0 | 1.5 | 1200 | 0,0514 | 4.0582 |
| 3 | -0,0045 | 0,00035383 | 1 | 0 | 1 | 1400 | 0,0548 | 7.8459 |

Cálculos de la constante para espacio de estados y constantes de realimentación del controlador todas las secciones lineales. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

3.6 Simulación de los controladores

Luego de calcular las constantes (K_a) y (K_b) y las variables A , B , C y D , se puede configurar los controladores como se puede ver la Figura 3.16, este proceso se lo realiza en Simulink de MATLAB®, para el primer controlador se ingresa las constantes correspondientes calculas anteriormente y definidas en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3

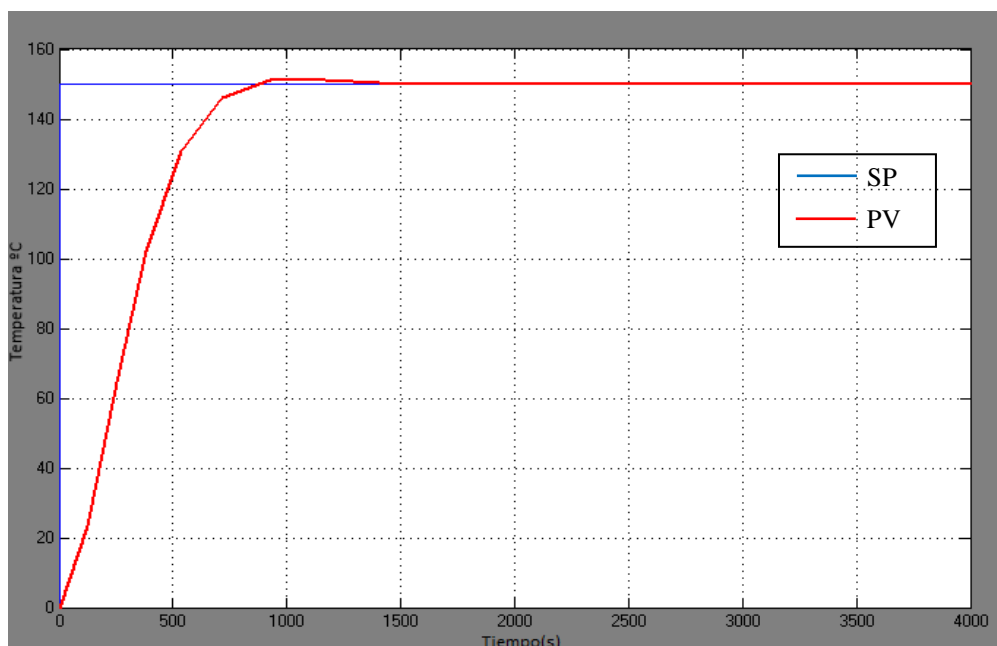
Figura 3.16 Desarrollo de controlador para la primera sección.



Controlador de temperatura para la primera sección entre 140 °C a 168 °C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Figura 3.17, se observa la respuesta del controlador en función de la temperatura generada por las niquelinas del horno eléctrico, en este ejemplo se configura una referencia SP (Setpoint) de 150 °C y la variable del proceso PV (Process Value), se obtiene un máximo sobre impulso del 1 % que corresponde a 2° C aproximadamente.

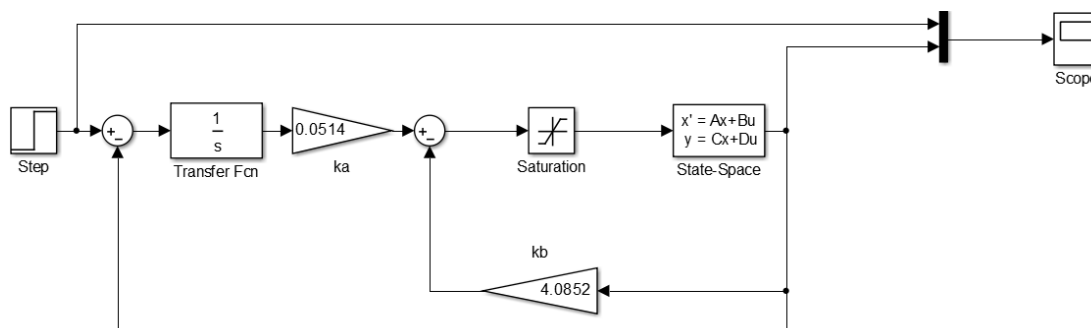
Figura 3.17 Simulación de controlador para la primera sección



Línea azul indica el Setpoint y la línea roja indica la respuesta del controlador. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Como se puede observar en la Figura 3.18, se realiza el mismo procedimiento para el segundo controlador, este proceso se lo realiza en Simulink de MATLAB®, para el segundo controlador se ingresa las constantes correspondientes calculas anteriormente y definidas en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

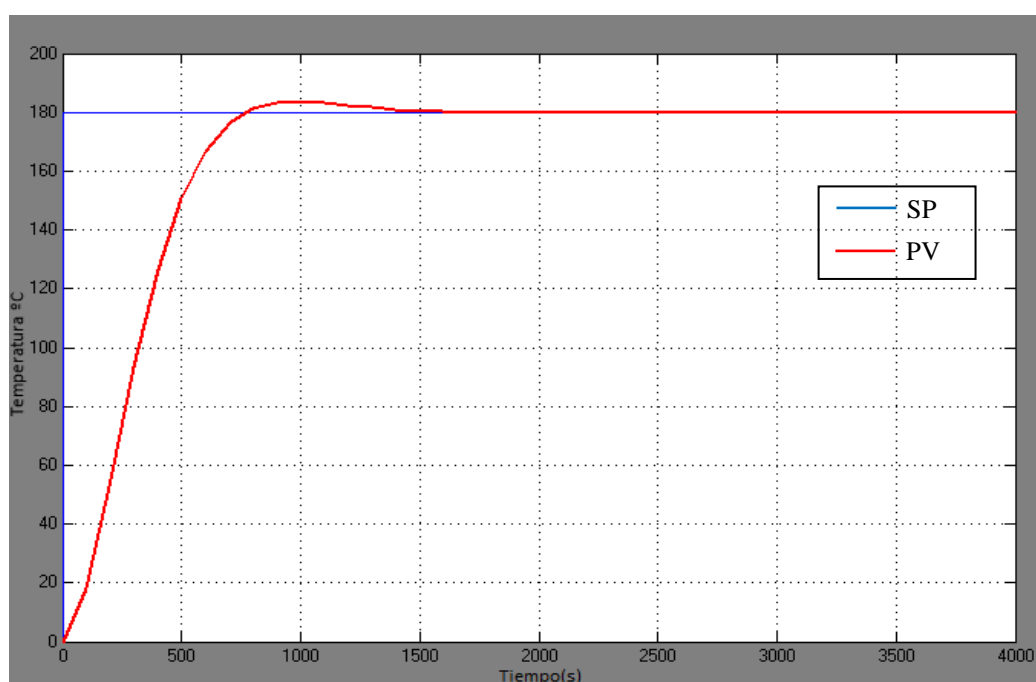
Figura 3.18 Desarrollo de controlador para la segunda sección.



Controlador de temperatura para la segunda sección entre 169°C a 189°C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Figura 3.19, se observa la respuesta del controlador en función de la temperatura, en este ejemplo se configura un Setpoint de 180 °C y se obtiene un máximo sobre impulso del 1.5% que corresponde a unos 3 °C, en este proceso la planta tiende a estabilizarse a los 1600 segundos aproximadamente ya que la estructura del horno eléctrico industrial mantiene la temperatura generada por las niquelinas.

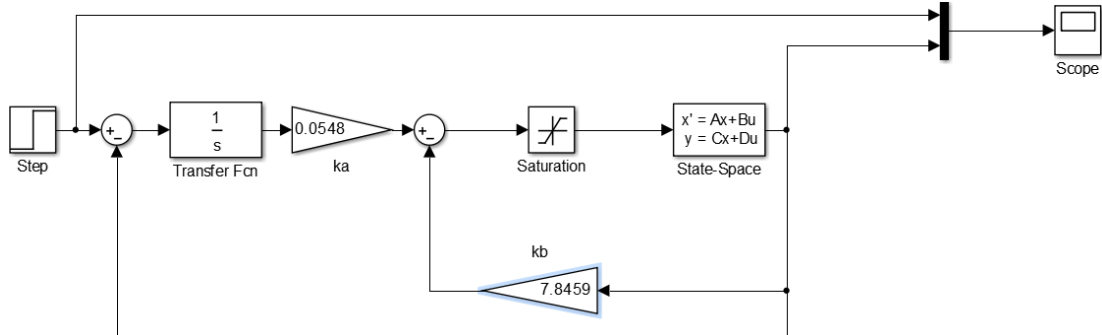
Figura 3.19 Simulación de controlador para la segunda sección



Línea azul indica el Setpoint y la línea roja indica la respuesta del controlador. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Por último, en la Figura 3.20, se configura el controlador con los valores de la tercera sección, este proceso se lo realiza en Simulink de MATLAB®, para este controlador se ingresa las constantes correspondientes calculas anteriormente y definidas en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

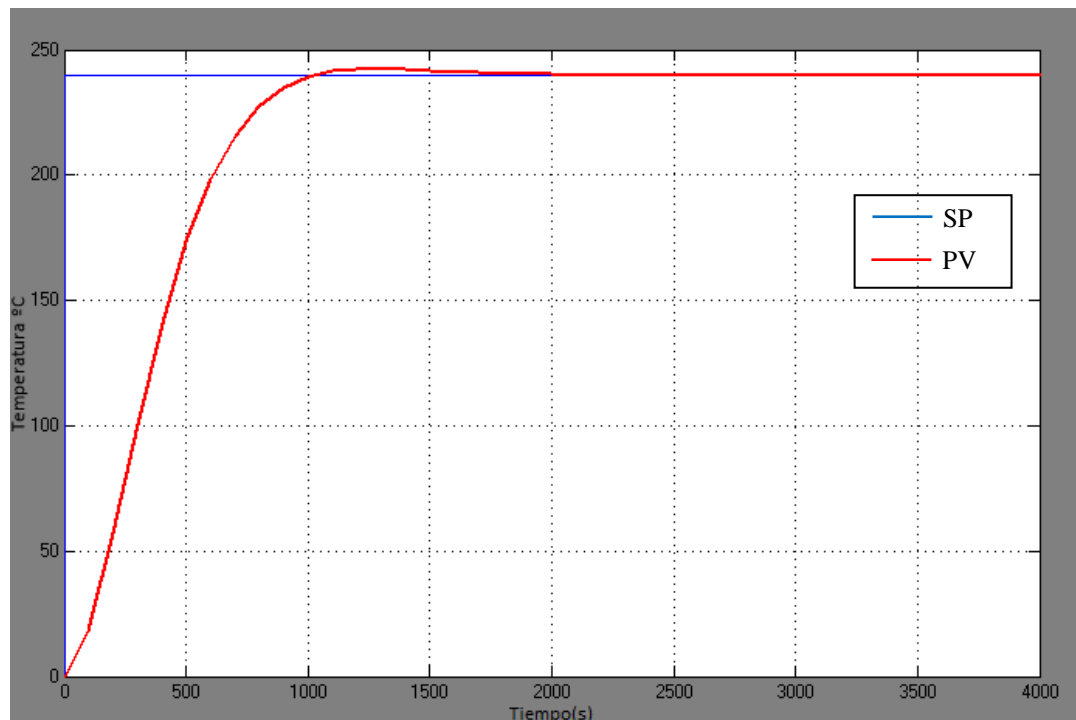
Figura 3.20 Simulación de controlador para el segundo rango o sección



Controlador de temperatura para la tercera sección entre 190°C a 240°C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Figura 3.21, se observa la respuesta del controlador en función de la temperatura que genera las niquelinas del horno eléctrico industrial, en este ejemplo se configura un Setpoint de 240 °C y se obtiene un máximo sobre impulso del 1 %, debido a que el horno eléctrico industrial está llegando a su temperatura máxima.

Figura 3.21 Simulación de controlador para el tercer rango o sección



Línea azul indica el Setpoint y la línea roja indica la respuesta del controlador. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales.

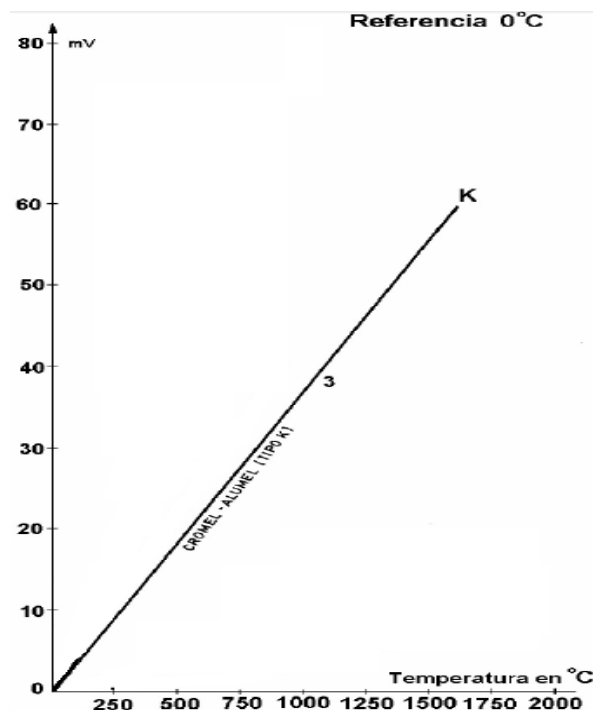
3.7 HMI del proceso

Se realiza una breve descripción de los componentes del HMI y su funcionamiento para el establecimiento del controlador por espacio de estados.

3.7.1 Termocupla

La termocupla o termopar es de tipo k, por la razón que alcanza grandes temperaturas y la curva característica indica que la variación de milivoltios es directamente proporcional a la temperatura, por lo tanto, es lineal como se observa en la Figura 3.18.

Figura 3.22 Curvas característica de las termocuplas



Curva característica de la termocupla tipo k es casi lineal. Fuente: (UNET, 2016)

Este tipo de termocupla lee señales de temperatura (análogo) las cuales ingresan al controlador por medio de ADC (Convertidor Análogo - Digital), que convierta la señal analógica a señal digital, de esta manera el controlador interpreta las señales receptadas por la termocupla.

La termocupla tipo k es una aleación de níquel y cromo. Con un rango de medición de -200 °C a 1250 °C, hay que mencionar que tiene un uso limitado en vacío o atmósferas reductoras. Dispone de un amplio rango de temperatura, la cual es la calibración más popular este tipo de termopar es muy común en la industria química, alimenticia, textil, fundición de metales y sobre todo en hornos en general. (Industrial, 2017)

3.7.2 Módulo MAX 6675

Para que el controlador pueda interpretar las señales de la termocupla tipo k debe pasar con un acondicionador por el cual convierte la señal analógica a señal digital, este acondicionador es el módulo MAX 6675, tiene resolución de 12 bits, 0.25°C.

Dentro de este pequeño dispositivo se encuentra la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por el termopar, lo que hace muy sencilla la tarea de conectar un termopar a un microcontrolador. (Zamudio, 2009)

3.7.3 Tarjeta STM32F4 Discovery

Es un dispositivo electrónico de desarrollo versátil y fácil de utilizar, tiene las principales características de un microcontrolador, posee una reprogramación rápida y fácil, mediante la unidad de depuración ST-LINK integrada en la tarjeta electrónica. La familia STM32F405xx incorpora memorias incrustadas de alta velocidad (memoria Flash de hasta 1 Mbyte), hasta 4 Kbyte de SRAM de respaldo, y una amplia gama de E / S mejoradas y periféricos conectados a dos APB autobuses. (life.augmented, 2012)

Todos los dispositivos ofrecen tres ADC de 12 bits, dos DAC, un RTC de baja potencia. También cuentan con interfaces de comunicación estándar y avanzadas, en la Tabla 3.4 se detalla las principales características de la tarjeta STM32F4

Tabla 3.4 Características de la tarjeta STM32F4

| Característica | Detalle |
|-------------------------------|------------------|
| Memoria flash | Hasta 1Mbyte |
| Suministro o alimentación | De 1,8V a 3,6V |
| Oscilación de cristal | Desde 4 a 26 MHz |
| Convertidores A/D | 3 x 12 bits |
| Convertidores D/A | 2 x 12 bits |
| Puertos de E/S | 140 |
| Interfaz de comunicación I2C | 3 |
| Interfaz de comunicación UART | 4 |
| Interfaz de comunicación SPI | 3 |

Principales características de la tarjeta STM32F4 Discovery. Fuente: (life.augmented, 2012)

3.7.4 Proceso

Los elementos y dispositivos descritos anteriormente son los que intervienen directamente en el controlador por espacios de estados con el cual funciona el horno eléctrico industrial (planta), como ya es de conocimiento el controlador es de lazo cerrado, en la Figura 3.23, se observa el diagrama de bloques con los elementos y dispositivos que se utiliza.

Figura 3.23 Diagrama de bloques del Proceso.

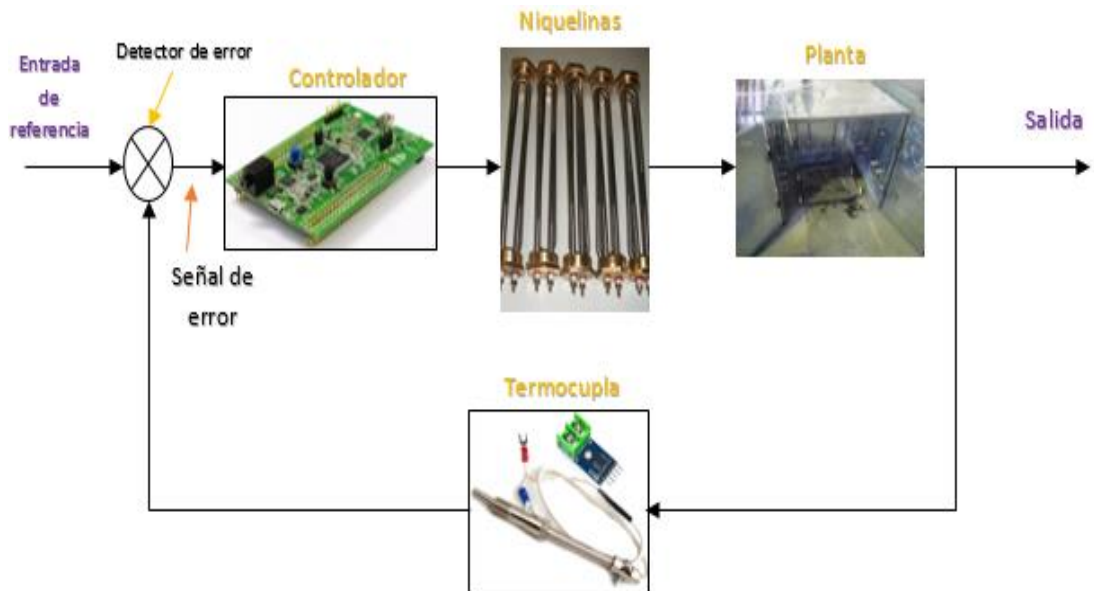


Diagrama de bloques del Proceso con la aplicación del nuevo controlador. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

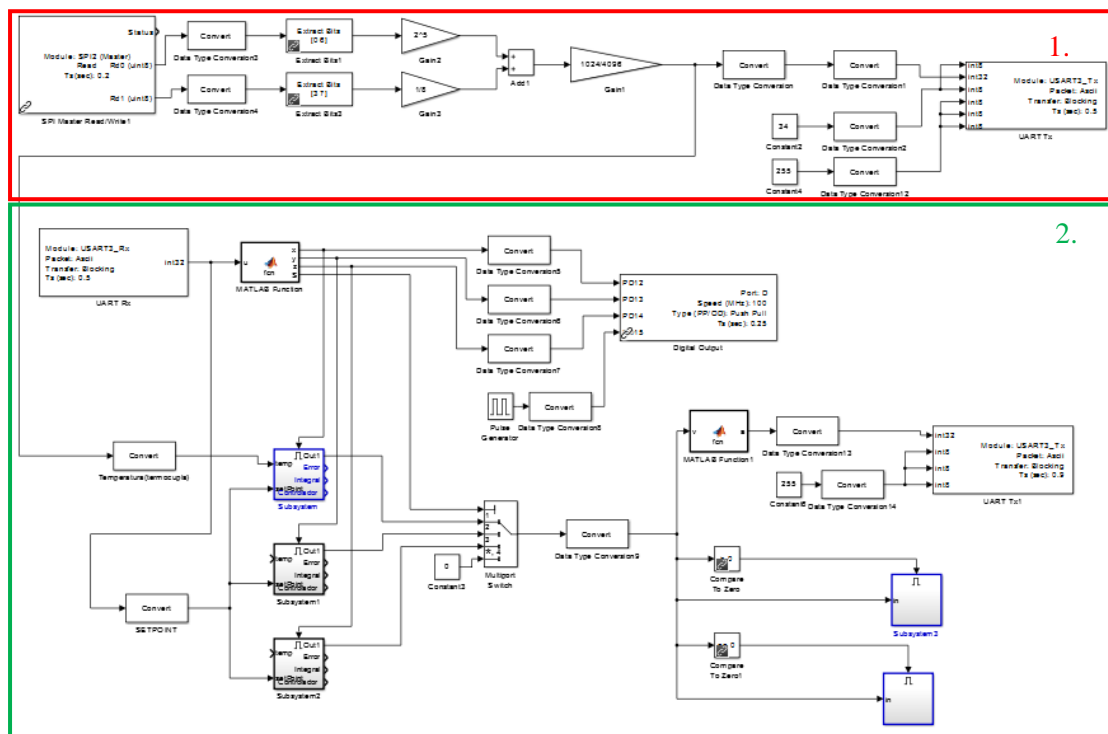
El controlador es el encargado de procesar la información entregada por la termocupla a través del ADC del módulo MAX 6675, además permite el control de la etapa de potencia para variar la intensidad de corriente en las niquelinas y de esta manera conseguir un aumento paulatino de temperatura según el requerimiento de tiempo establecido por el operario para los diferentes tamaños y peso de las máquinas eléctricas industriales en la empresa, todo este proceso es cíclico o conocido como realimentación.

Finalmente, este proceso tiene una referencia de temperatura (Setpoint) el cual es adaptado por el usuario u operario en el instante de la configuración inicial del proceso de secado y desprendimiento del barniz de los bobinados.

3.8 Implementación de controladores

Para la implementación de los controladores es necesario realizar un algoritmo en el software MATLAB® mediante la herramienta Simulink que permita comunicación de la entrada de la variable temperatura obtenida mediante el módulo MAX 6675 hacia la tarjeta STM32F407 Discovery para el procesamiento de la misma y la actuación del controlador en la temperatura deseada. Para finalmente realizar la acción de control ordenada por la pantalla touch Nextion NX8048T070 dirigida hacia las resistencias eléctricas variando la corriente de funcionamiento de las mismas para llegar al tiempo de establecimiento requerido a la temperatura configurada.

Figura 3.24 Algoritmo para la implementación de los controladores



Algoritmo realizado en MATLAB® para la implementación de los controladores del sistema. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Figura 3.24 se observan 2 secciones que componen el algoritmo para la implementación de los controladores en el sistema dependiendo el rango de temperatura en el cual se desea poner en funcionamiento al horno eléctrico industrial. Las secciones son las siguientes:

La primera parte como se indica en la Figura 3.25 se realiza la obtención del dato de temperatura actual del horno eléctrico, el cual es censado mediante la termocupla tipo k, este dato es obtenido mediante el módulo MAX 6675. Este módulo analiza la trama

de datos enviado por la termocupla y la procesa para luego convertirla en un dato y a su vez enviarlo hacia la tarjeta STM32F407 Discovery donde se realizará la segunda parte del algoritmo para identificar y poner en acción el controlador según los requerimientos del operario.

Continuando con la segunda parte de la implementación del programa como se muestra en la Figura 3.26, se tiene bloques de comunicación UART Tx para la transmisión de datos de la STM32F4 Discovery hacia el HMI y UART Rx para la recepción de datos del HMI hacia la tarjeta STM32F4 Discovery. Según la información insertada en la pantalla touch el switch dirige a la sección seleccionada y por último configurar el bloque de regulador DAC para el control de la etapa de potencia.

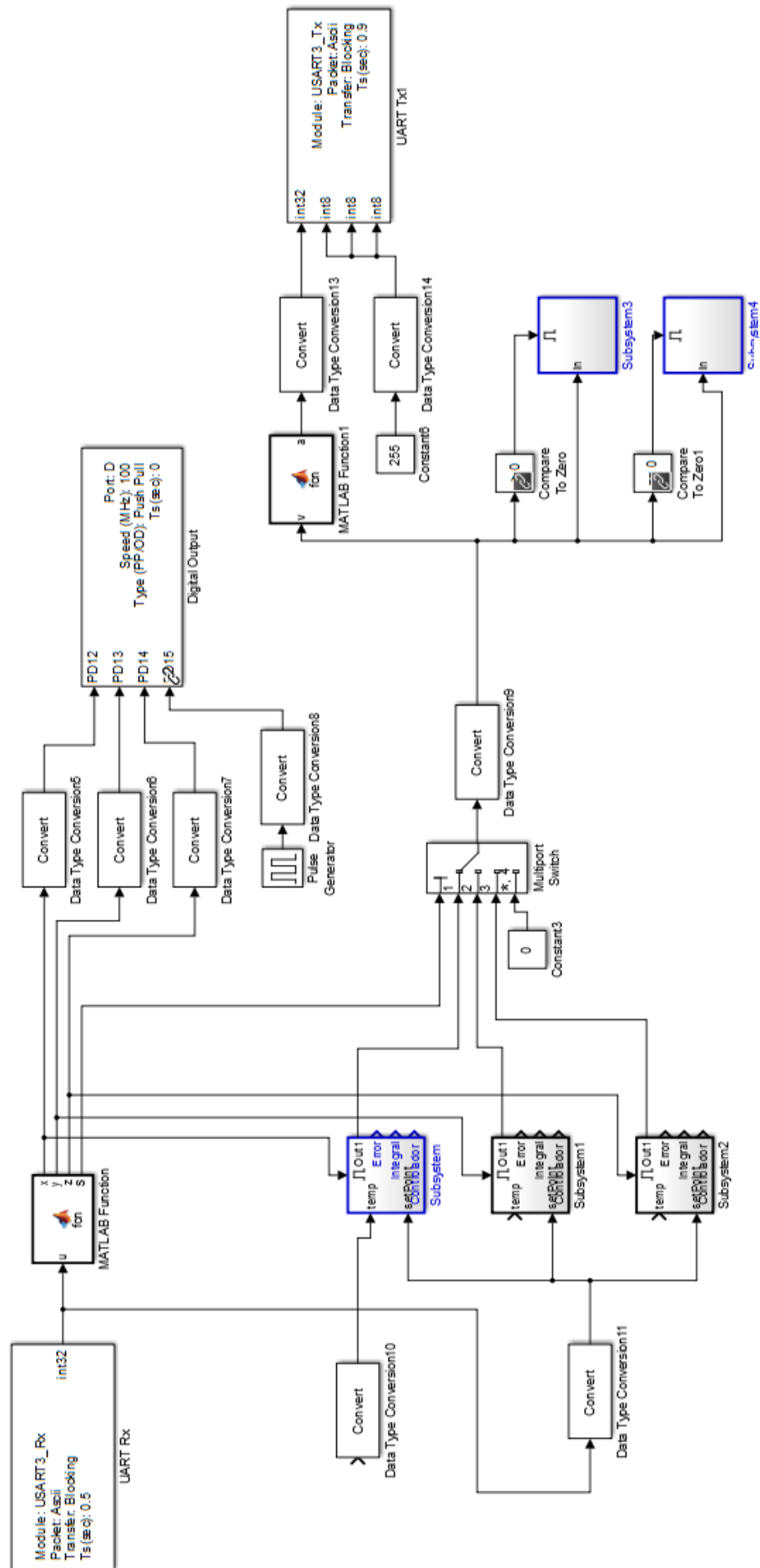
El bloque Digital Output, cumple la función encender o apagar los leds que incorpora la tarjeta STM32F4 Discovery, con el fin de dar a conocer al usuario en que rango o sección de temperatura está trabajando la planta. Se usa tres leds para este proceso, color naranja indica que está trabajando en el primer rango, el color rojo el segundo rango y por último el color verde indica el tercer rango o sección.

Los bloques function (función) permiten realizar operaciones matemáticas incluyendo variables locales, la programación se lo realiza en una ventana emergente (function) en esta se declaras las variables de entrada y salida para obtener resultados y ser utilizados en Simulink de MATLAB®.

Los bloques subsystem (subsistema) ayudan a reducir el tamaño y complejidad de la programación mediante la agrupación y simplificación de los bloques en subsistemas, sin perder la funcionalidad que lo caracterice.

33

Figura 3.26 Segunda parte del algoritmo de implementación de los



Descripción de la segunda parte del algoritmo de implementación de los controladores. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

3.8.1 Configuración de Pantalla Touch

La pantalla Touch Nextion NX8048T070 modelo: IM150416007 está conectada a la tarjeta STM32F407 Discovery mediante una interface UART.

A continuación, se muestra las dos pantallas que se desarrollaron en la pantalla Touch. En la Figura 3.27, se observa la pantalla de inicio donde se encuentra datos generales como el logotipo de la Universidad Politécnica Salesiana, junto con el tema del proyecto y sus autores. Después de un tiempo determinado ($t=2$ s) pasa automáticamente a la pantalla principal.

Figura 3.27 Pantalla inicial del HMI



Pantalla inicial desarrollada en la touch Nextion NX8048T070. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

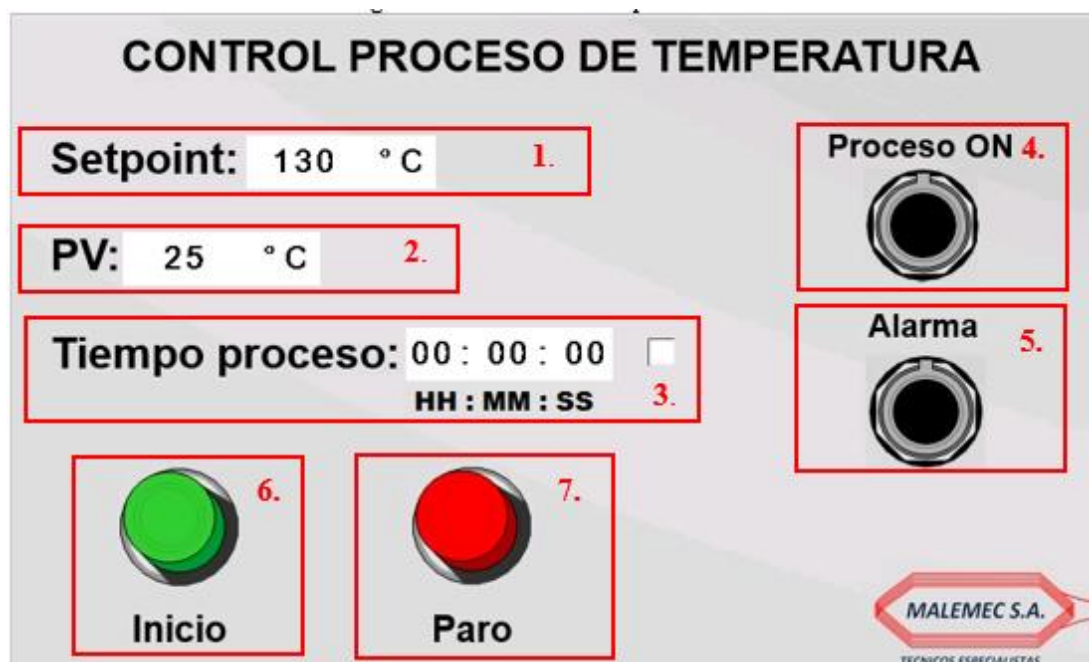
En la pantalla principal se muestra el logotipo de la empresa, seguido por las opciones como: Setpoint Temperatura, PV, Tiempo de Proceso. En esta misma pantalla se observa tres indicadores gráficos correspondientes al estado en tiempo real del horno eléctrico para el proceso de secado de barniz en los bobinados de las maquinas eléctricas, los cuales son los siguientes: Proceso ON y Alarma. Finalmente, en la parte inferior izquierda aparecen dos botones, uno verde y uno rojo, correspondientes al inicio y al paro del proceso.

Como se puede observar en la Figura 3.28 se encuentran los parámetros para realizar las acciones de control, las cuales consisten en configurar la temperatura deseada para

un determinado tiempo de secado, esta acción de control se la puede realizar con el monitoreo del tiempo desde la pantalla touch o sin la activación del mismo. El tiempo del proceso de secado está configurado según los requerimientos de la empresa y el tipo de barniz que se aplique a los bobinados, los cuales consisten en un tiempo mínimo de 1 hora y un tiempo máximo de 3 horas. Es importante mencionar que la acción de control para monitorear el tiempo del proceso en la pantalla touch se la puede activar o desactivar pulsando el cuadro de activación al final de la celda de Tiempo de proceso.

El indicador correspondiente al Proceso ON, se activa una vez que finalice el operario la configuración del mismo.

Figura 3.28 Pantalla Principal del HMI



Pantalla principal desarrollada en la touch Nextion NX8048T070. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Según lo antes mencionado, en la Figura 3.28 se realizan las acciones de control que permiten la configuración de la temperatura deseada en un determinado tiempo para realizar el proceso de secado.

En la Tabla 3.5 se describe el funcionamiento de cada ítem que interviene en el funcionamiento del horno eléctrico industrial.

Tabla 3.5 Descripción de los componentes de la Pantalla Principal

| Ítem | Descripción |
|------|--|
| 1 | Parámetro para configurar la temperatura a la cual se debe realizar el proceso de secado de los bobinados de una máquina eléctrica industrial. |
| 2 | Variable del proceso que visualiza la temperatura en la que se encuentra el horno eléctrico industrial en tiempo real. |
| 3 | Tiempo de proceso sirva para determinar la duración del proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial. |
| 4 | Luz piloto de color verde, que indica el inicio del proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial. |
| 5 | Luz piloto de color rojo, que indica si la VP sobrepasa el rango de operación ± 10 °C en comparación al Setpoint de temperatura. |
| 6 | Pulsador de color rojo encargado de iniciar el proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial. |
| 7 | Pulsador de color rojo encargado de parar el proceso de funcionamiento del horno eléctrico industrial. |

Descripción de los componentes de la pantalla principal y sus características. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

CAPÍTULO 4

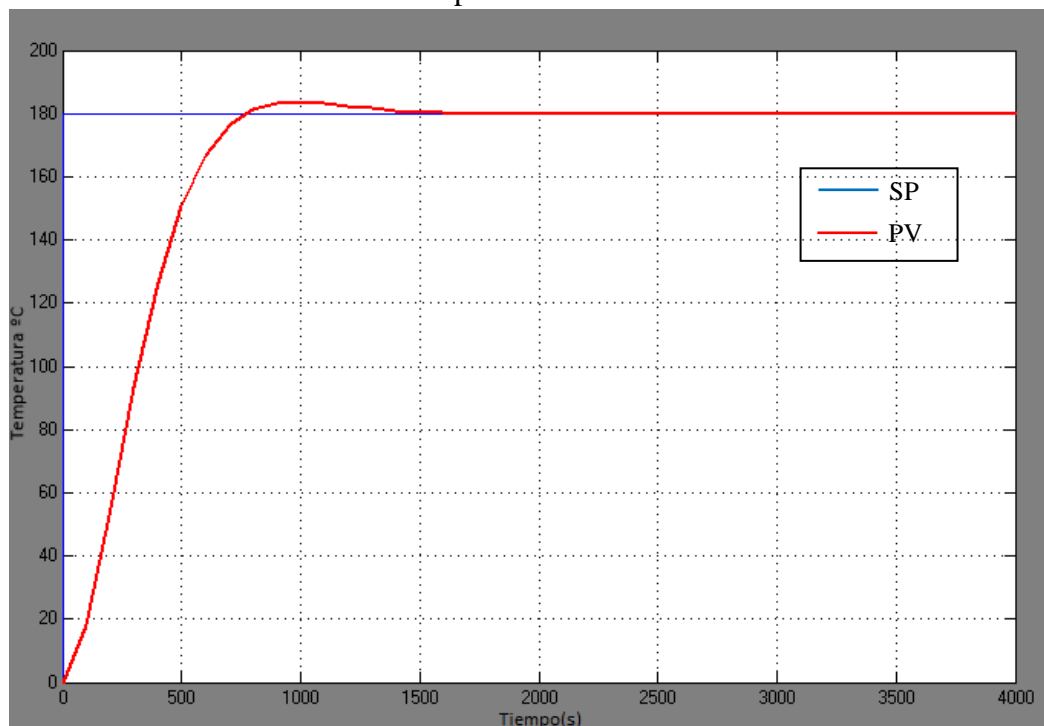
PRUEBAS Y RESULTADOS

En este último capítulo se compara resultados obtenidos mediante la simulación con la implementación del controlador basado en espacio de estados del horno eléctrico industrial (planta), mediante los parámetros principales que se caracteriza un sistema de control.

4.1 Simulación

Para la realización de esta prueba se tomó como ejemplo la segunda sección de linealización que tiene el rango de 168 °C a 190 °C, se configura el Setpoint o punto de establecimiento de 180 °C, y obtenemos el siguiente resultado como se observa en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Curva característica del resultado de la simulación del controlador basado en espacio de estados.



Gráfica del resultado de la simulación del controlador basado en espacio de estados con un Setpoint de 180°C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

A continuación, se analiza algunos de los parámetros del sistema, con el fin de comparar los resultados con el mismo controlador implementado en el horno eléctrico industrial (planta).

El primer parámetro que se va a calcular es el máximo sobre impulso, para lo cual se usa la siguiente ecuación:

$$Mp = \frac{Y_{max} - Y_{ss}}{Y_{ss}} \times 100\% \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Donde:

Mp = Máximo sobre impulso

Y_{max} = Temperatura máxima que obtiene la planta

Y_{ss} = Temperatura de Setpoint

Entonces, obteniendo los datos implementamos en la ecuación 4.1

$$Mp = \frac{183,66 - 180}{180} * 100\%$$

$$Mp = 2,03 \%$$

Para el cálculo del tiempo de establecimiento se obtiene cuando la curva se estabiliza de acuerdo a la temperatura de Setpoint, en esta prueba el tiempo de establecimiento es:

$$Ts = 1750 \text{ s}$$

Por último, se calcula el error en estado estacionario del controlador simulado, tomando en cuenta que se lo realizó mediante una entrada escalón. El cálculo se lo realiza según la siguiente ecuación:

$$E(s) = \frac{U(s)}{1 + G(s)} \quad \text{Ec. (4.2)}$$

Donde:

$U(s)$ = Transformada de Laplace de $u(t)$

$G(s)$ = Función de transferencia de la planta

Aplicando la ecuación 4.2 se obtiene los siguientes resultados:

$$E(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{0,0864}{1688,8s + 1}}$$

Posterior se aplica el límite de cuando s tiende a cero para poder visualizar la tendencia de estabilización del sistema en un tiempo determinado.

$$Error = (t \rightarrow \infty)$$

$$Error = \lim_{s \rightarrow 0} S \times E(s)$$

$$Error = \lim_{s \rightarrow 0} S \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{0,0864}{1688,8s + 1}}$$

$$Error = \frac{1}{1 + \frac{0,0864}{1}}$$

$$Error = \frac{1}{1,0864}$$

$$Error = 0,92 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tabla 4.1 Parámetros del controlador simulado basado en espacio de estados.

| Parámetros | Definición | Resultado |
|------------|------------------------------|-----------|
| Mp (%) | Máximo sobre impulso | 2,03 % |
| ts (s) | Tiempo de establecimiento | 1750 s |
| Ess | Error en estado estacionario | 0,92 °C |

Descripción de los parámetros del controlador simulado en la segunda sección de linealización.

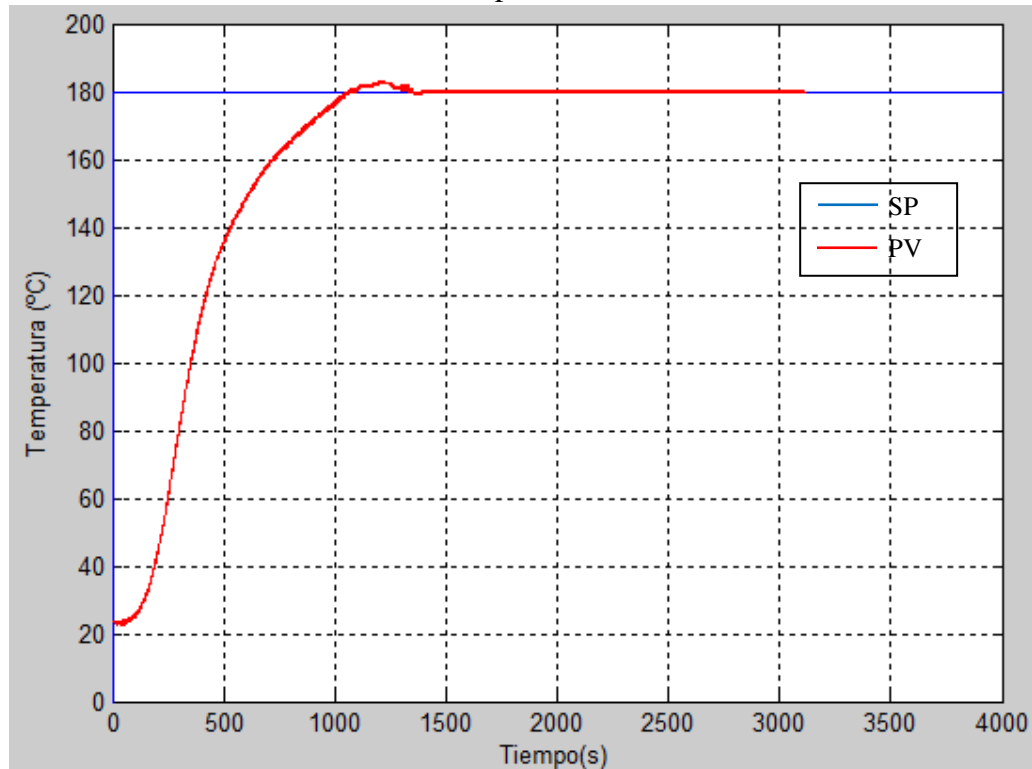
Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

4.2 Implementación

A continuación, se analiza la Figura 4.2, la cual corresponde a la gráfica resultante de la implementación del controlador en espacio de estados, utilizando la segunda sección resultante de la linealización del comportamiento de la planta. En la implementación

del controlador se estableció un Setpoint de 180 °C, con lo cual se visualizará su tiempo de establecimiento.

Figura 4.2 Curva característica del resultado de la implementación del controlador basado en espacio de estados.



Gráfica del resultado de la implementación del controlador basado en espacio de estados con un Setpoint de 180°C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El primer parámetro que se va a calcular es el máximo sobre impulso, para lo cual se usa la ecuación 4.1

$$Mp = \frac{Y_{max} - Y_{ss}}{Y_{ss}} \times 100\%$$

Donde:

Mp = Máximo sobre impulso

Y_{max} = Temperatura máxima que obtiene la planta

Y_{ss} = Temperatura de Setpoint

Entonces, obteniendo los datos implementamos en la ecuación 4.1

$$Mp = \frac{183 - 180}{180} * 100\%$$

$$Mp = 1.66\%$$

De la misma forma que en la simulación el tiempo de establecimiento es obtenido cuando la curva se estabiliza de acuerdo a la temperatura de Setpoint, en esta prueba el tiempo de establecimiento es:

$$Ts = 1470 \text{ s}$$

Por último, para calcular el error en estado estacionario se aplican la ecuación 4.2, obteniendo los siguientes resultados:

$$E(s) = \frac{U(s)}{1 + G(s)}$$

$$E(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{8,224}{7052s + 1}}$$

Posterior se aplica el límite cuando (s) tiende a cero para poder visualizar la tendencia de estabilización del sistema en un tiempo determinado.

$$Error = (t \rightarrow \infty)$$

$$Error = \lim_{s \rightarrow 0} S \times E(s)$$

$$Error = \lim_{s \rightarrow 0} S \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{8,224}{7052s + 1}}$$

$$Error = \frac{1}{1 + \frac{8,224}{1}}$$

$$Error = \frac{1}{9,224}$$

$$Error = 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 4.2 Parámetros del controlador implementado basado en espacio de estados.

| Parámetros | Definición | Resultado |
|-------------------|------------------------------|------------------|
| Mp (%) | Máximo sobre impulso | 1,66 % |
| ts (s) | Tiempo de establecimiento | 1470 s |
| Ess | Error en estado estacionario | 0,10 °C |

Descripción de los componentes de la pantalla principal y sus características. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

En la Tabla 4.3 se indica los valores obtenidos al implementar el controlador, para estimar un valor aproximado del tiempo de establecimiento durante la prueba de funcionamiento, con un Setpoint de 180 °C y temperatura ambiente de 23 °C.

Tabla 4.3 Tabla de datos en la etapa de funcionamiento de la planta

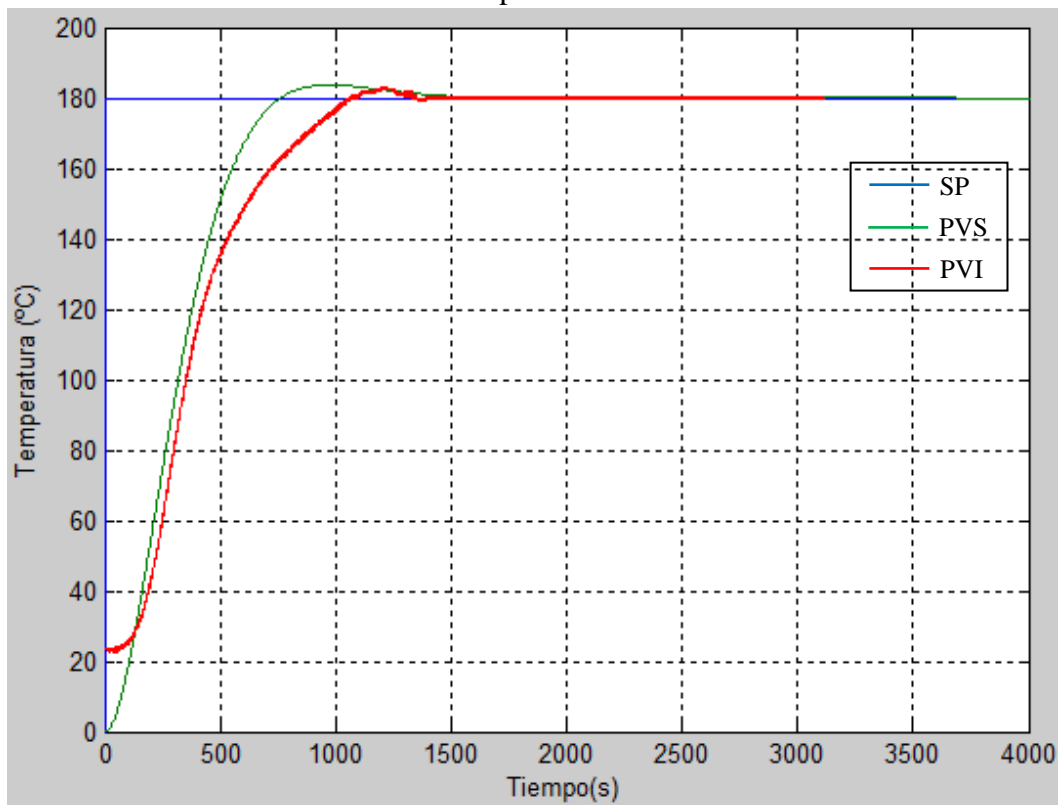
| Tiempo (min) | Variable del proceso PV (°C) |
|-------------------------|---|
| 1 | 23 |
| 2 | 26 |
| 3 | 29 |
| 4 | 32 |
| 5 | 42 |
| 6 | 51 |
| 7 | 77 |
| 8 | 99 |
| 9 | 111 |
| 10 | 128 |
| 11 | 134 |
| 12 | 147 |
| 13 | 153 |
| 14 | 159 |
| 15 | 164 |
| 16 | 168 |
| 17 | 171 |
| 18 | 175 |
| 19 | 179 |
| 20 | 180 |

Valores de la variable del proceso durante la prueba de funcionamiento. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

4.3 Contraste simulación vs. Implementación

En esta sección se realiza la comparación de los parámetros obtenidos en la simulación del control por espacio de estados, así como también su respectiva implementación para realizar un contraste del desempeño según el comportamiento de la planta en relación al Setpoint de temperatura establecido. Como se puede observar en la Figura 4.3, la línea azul es el Setpoint de temperatura, la línea de color verde indica la respuesta del controlador simulado y la línea de color rojo es la respuesta del controlador implementado

Figura 4.3 Gráfica de la simulación vs. la implementación del controlador con un Setpoint de 180 °C



Comparación del resultado de la simulación vs. la implementación del controlador con Setpoint de 180 °C. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Según los valores obtenidos de los parámetros del controlador en espacio de estados tanto en la simulación como en la implementación se puede deducir lo siguiente:

La curva de comportamiento de la planta simulada, tiene un máximo sobre impulso debido a los parámetros iniciales que se configuró para el modelamiento; y comparando con la curva de comportamiento de la planta implementada esta tiene un leve máximo sobre impulso debido a las propiedades que tiene el material que conforma el horno eléctrico industrial para retener el calor.

En cuanto a los tiempos de establecimientos, hay que recalcar que la curva de comportamiento de la planta simulada comienza desde una temperatura de 0 °C, mientras que la curva de comportamiento de la planta implementada comienza desde una temperatura ambiente (23 °C), este factor tiene un ligero efecto en el comportamiento del tiempo de establecimiento de las curvas.

Por último, cuando la señal de entrada al sistema es escalón, el error en estado estacionario se denomina como error de posición y se define como la diferencia entre la señal de referencia y la salida proporcionada para esta entrada, hay que tomar en cuenta que estas dos señales tienen las mismas magnitudes y unidades.

Otra característica importante para verificar el desempeño de controlador por espacio de estados implementado en el horno eléctrico industrial es la cantidad de corriente que utilizan las niquelinas durante el proceso de funcionamiento, en este caso para un Setpoint de temperatura de 180 °C durante el tiempo que se demora en llegar a la temperatura establecida por el operario (20 min).

Es importante mencionar que el control basado en espacio de estados incorpora una etapa de potencia que utiliza corriente según la necesidad de la planta, esto quiere decir que la planta nunca trabaja a plena carga, a menos que se configure una temperatura máxima (240 °C) a la cual los actuadores puedan funcionar solo durante un intervalo de tiempo que el controlador crea conveniente para poder llegar a la temperatura seteada para evitar un máximo sobre impulso muy elevado y un tiempo de establecimiento muy alto.

Al analizar los datos obtenidos en la Tabla 4.4 sobre la lectura de valores entre el control de temperatura anterior (control ON/OFF) con el implementado, se verifica que el consumo de energía eléctrica en la Empresa MALEMEC S.A. disminuye considerablemente, aproximadamente se disminuye el consumo en un 40%, ya que con el anterior control que contaba el horno eléctrico industrial consumía un promedio de corriente equivalente a 15 A, lo cual nos indica que el desempeño del controlador implementado mejoró en comparación al consumo energético con el anterior controlador que contaba la empresa.

Tomando la curva característica del resultado de la implementación del controlador basado en espacio de estados de la Figura 4.2, los valores de corriente en función tiempo, se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Tabla de consumo de corriente en el horno eléctrico industrial

| Tiempo (min) | I (A) | Tiempo (min) | I (A) |
|-------------------------------|-------|--------------|-------|
| 1 | 0,4 | 11 | 11,6 |
| 2 | 1,4 | 12 | 11,9 |
| 3 | 5 | 13 | 11,7 |
| 4 | 6,9 | 14 | 11,8 |
| 5 | 7,9 | 15 | 11,7 |
| 6 | 11,3 | 16 | 12,1 |
| 7 | 11,9 | 17 | 12,1 |
| 8 | 12,1 | 18 | 11,9 |
| 9 | 12,1 | 19 | 12,0 |
| 10 | 11,8 | 20 | 5,6 |
| Promedio Corriente (A) | | 8,3A | |

Corriente promedio utilizando el controlador basado en espacio de estados del horno eléctrico industrial. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Para contrastar los valores de los parámetros correspondientes al máximo sobre impulso, tiempo de establecimiento y error en estado estacionario ilustrados en la Tabla 4.5 se debe realizar diagramas de barras, con el objetivo de observar la variación de los valores de los parámetros obtenidos con el controlador simulado y en el implementado.

Tabla 4.5 Tabla de comparación de parámetros del controlador simulado y el implementado

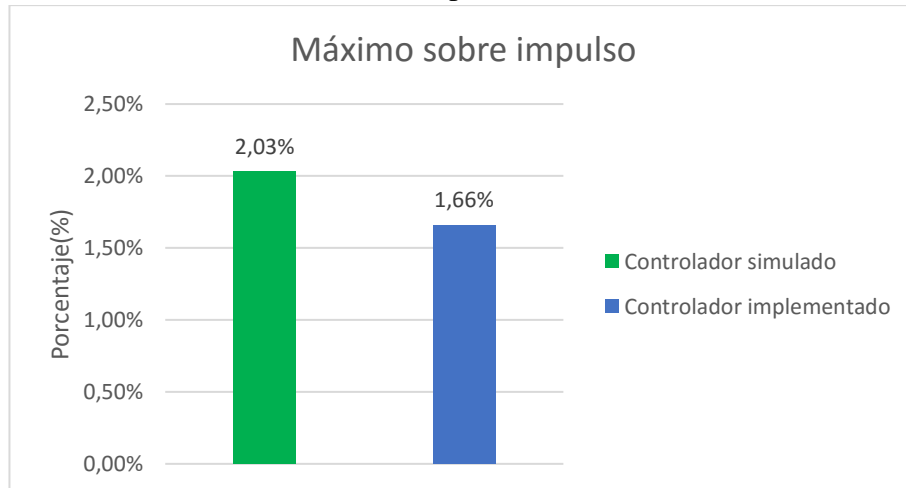
| Parámetros | Definición | Simulado | Implementado |
|------------|------------------------------|----------|--------------|
| Mp (%) | Máximo sobre impulso | 2.03 % | 1,66 % |
| ts (s) | Tiempo de establecimiento | 1750 s | 1470 s |
| Ess | Error en estado estacionario | 0,92 °C | 0,10 °C |

Corriente promedio utiliza en controlador durante el funcionamiento del horno eléctrico industrial. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El parámetro de máximo sobre impulso es muy importante en el estudio de controladores ya que, si este parámetro estuviese fuera de los límites, causar problemas

con el producto final; si el control de la planta tiende a salirse de tus rangos límites se puede decir que el controlador no esté eficiente; por esta razón analizando el máximo sobre impulso del controlador simulado e implementado se verifica que difiere un 0.37%, esto quiere decir que el controlador implementado mejora al simulado.

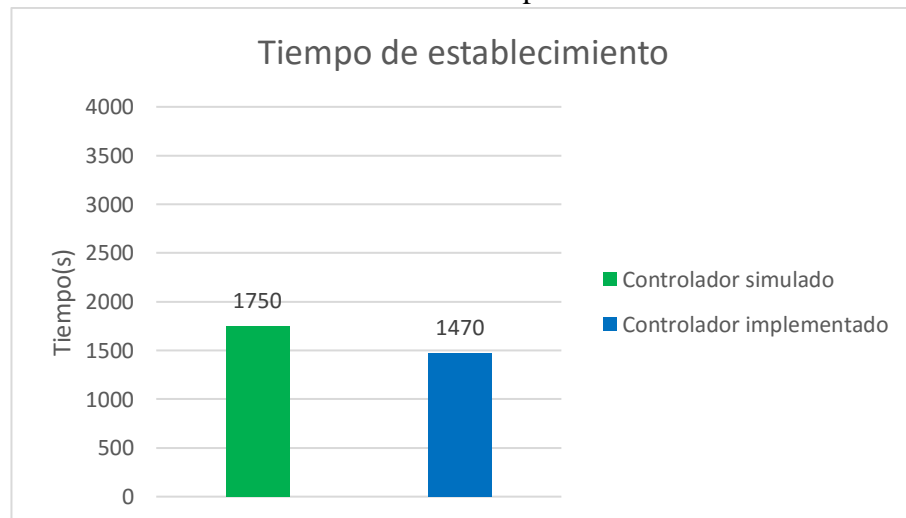
Figura 4.4 Diagrama de barras del máximo sobre impulso del controlador simulado e implementado.



Comparación de los valores del máximo sobre impulso del controlador simulado con el implementado. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

El valor de tiempo de establecimiento puede variar dependiendo del valor inicial en el que se tome los datos en el controlador simulado, en este caso comenzamos desde una temperatura de 0 °C; sin embargo, la diferencia del tiempo de establecimiento del controlador simulado con el implementado no supera los 5 minutos.

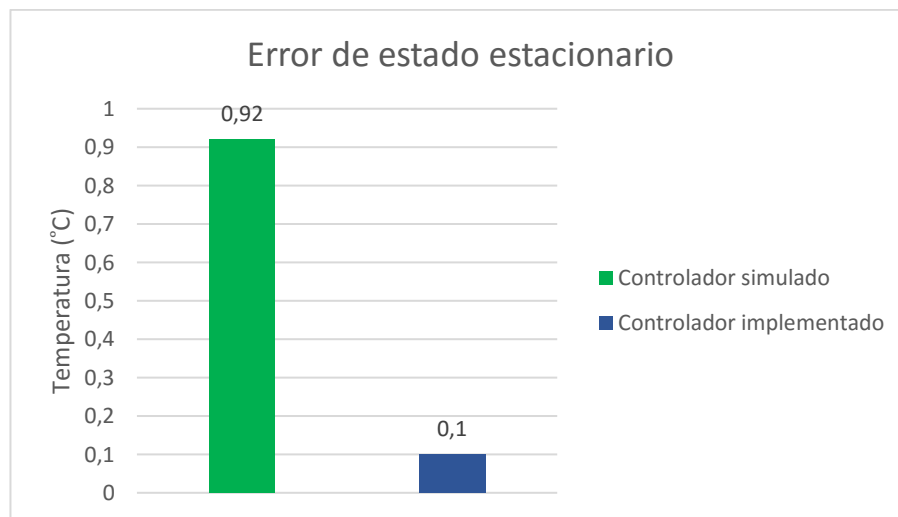
Figura 4.5 Diagrama de barras del tiempo de establecimiento del controlador simulado e implementado.



Comparación de los valores del tiempo de establecimiento del controlador simulado con el implementado. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Por último, analizando el error de estado estacionario se determina sus valores respectivos y se tiene una diferencia de 0.8 °C, este resultado obtenido no produce alteraciones en el producto final, ya que los tipos de resinas utilizados en la Empresa MALEMEC S.A. tiene una diferencia de más de 50 °C.

Figura 4.6 Diagrama de barras del error en estado estacionario del controlador simulado e implementado



Comparación de los valores del error en estado estacionario del controlador simulado con el implementado. Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

CONCLUSIONES

Se desarrolló el HMI para el control de proceso de temperatura con espacio de estados del horno eléctrico industrial en la Empresa MALEMEC S.A., el cual es utilizado para controlar la variable de temperatura con la finalidad de mejorar el proceso de curado (secado) del barniz y la recuperación de aislamiento del bobinado de las máquinas eléctricas, de esta manera estableció una interfaz de fácil interpretación para cualquier operario.

Se obtuvo las características técnicas de cada dispositivo que interviene en el funcionamiento del sistema, lo cual permitió interpretar su comportamiento y secuencia de funcionamiento logrando así obtener los parámetros de configuración en respuesta a una entrada rampa, logrando determinar los valores de la constante de tiempo y la ganancia para establecer la función de transferencia (modelo matemático) de la planta.

Se diseñó el controlador en espacio de estados para el control de proceso de temperatura del horno eléctrico industrial, utilizando para esto el método de linealización de la planta determinando los rangos de operación válidos, y poder calcular las constantes de la función en espacio de estados y las constantes de realimentación según el tiempo de establecimiento y temperatura que se requiera.

Se implementó el controlador en espacio de estados para el control de proceso de temperatura, estableciendo una comunicación UART entre la touch y el controlador y una comunicación SPI entre el módulo de adquisición de datos y el controlador. De esta manera, se desarrolló el control del aumento gradual de la temperatura para llegar a la temperatura deseada por el operario variando su corriente hacia el actuador.

Se realizó la simulación del comportamiento de la planta con el control de temperatura basada en espacio de estados, demostrando una reducción de máximo sobre impulso y obteniendo un error nulo de Setpoint de temperatura con la variable de proceso de la planta simulado, comparado con el controlador ON/OFF que poseía anteriormente la planta.

Se realizó el contraste entre la simulación e implementación del comportamiento de la planta con el control de temperatura basado en espacio de estados, mejorando el desempeño del controlador implementado con un 0.37 % en cuanto al máximo sobre impulso, y también disminuyendo el tiempo de establecimiento hasta en 4,66 minutos, estos datos se deben a la variación de temperatura de inicio con la que se obtuvo los resultados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar los procedimientos de mantenimiento preventivo de los dispositivos electrónicos como son: pantalla touch, tarjeta STM, termocupla y niquelinas, como también revisar periódicamente las conexiones en la toma de suministro de energía eléctrica.

Se recomienda abrir las puertas del horno eléctrico industrial después de finalizar el proceso de curado o secado de bobinas, con el fin enfriar rápidamente a él o a los estatores. El horno eléctrico industrial puede alcanzar temperaturas muy elevadas las cuales pueden causar quemaduras de segundo grado a los usuarios que manipulen de manera incorrecta.

Realizar de manera correcta el uso del jumper que permite el puente de soldadura SB10 que está conectado al pin NRST de la STM STM32F407 Discovery, con lo cual se permite la alimentación externa de la tarjeta y a su vez facilitar la carga del algoritmo de control las veces que sea necesario.

Verificar que la adquisición de datos de temperatura sea de manera correcta, ya que los datos que se transmiten en toda la trama del módulo MAX 6675 hacia la tarjeta de control STM STM32F407 Discovery deben ser procesados para poder ser visualizados en la Touch Nextion NX8048T070.

REFERENCIAS

- Arboleda, M. (18 de abril de 2012). *GUIA TEORICA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/90055864/GUIA-TEORICA-MODELACION-Y-SIMULACION>
- Domínguez, S. (2006). *Control en el espacio de estado*. Madrid: Pearson.
- Egea, & Sarmiento. (2009). *Modelado y control de temperatura para horno eléctrico*. Bogotá.
- Electronic, X. (01 de 2016). *TouchWin*. Recuperado el 03 de 07 de 2017, de <http://techdesign.com.ec/techw/wp-content/uploads/2016/01/TH-series-HMI.pdf>
- Excrivá. (30 de 09 de 2010). *Diseño, Identificación y Control*. Obtenido de Diseño, Identificación y Control: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11346/Tesina%20Alfonso%20Escriva%20Calafat%202010.pdf?sequence=1>
- Favio, C. (20 de octubre de 2017). *Maestría en Modelado y Simulación MM&S*. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Flores Medina, M. S. (26 de 03 de 2016). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO INDUSTRIAL UTILIZADO EN EL PROCESO DE SECADO DEL BOBINADO DE MOTORES Y GENERADORES ELÉCTRICOS EN LA EMPRESA AFLOMOTORS DE LA CIUDAD DE QUITO*. Quito: UPS.
- Flores, A. (29 de Enero de 2009). *Linealización de Funciones No Lineales*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/106671667/Linealizacion-de-Funciones-No-Lineales>
- Industrial, J. (17 de octubre de 2017). *JM Industrial*. Obtenido de JM Industrial: <https://www.jmi.com.mx/literatura/blog/item/39-tipos-y-aplicaciones-de-los-termopares.html>

- Khalil. (17 de 02 de 2002). *Nonlinear Systems*. New Jersey: Prentice Hall. Obtenido de
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7044/tesis489.pdf?sequence=1>
- life.augmented. (12 de octubre de 2012). *STM32F405xx*. Obtenido de STM32F405xx:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson.
- PARAGON. (julio de 2015). *Que es simulación*. Obtenido de
<http://www.paragon.com.br/es/academico-2/que-es-simulacion/>
- Reyes, H., & Montaña, M. (21 de Junio de 2010). *Modelamiento y control digital de temperatura*. Obtenido de Modelamiento y control digital de temperatura:
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7044/tesis489.pdf?sequence=1>
- Rodríguez, & Bordóns. (5 de mayo de 2005). *Apuntes de Ingeniería de Control*. Obtenido de <http://www.esi2.us.es/~danirr/apuntesIC4.pdf>
- Scenna. (1999). *Modelado, simulación y optimización de procesos*.
- Turmero, P. (25 de octubre de 2015). *Análisis básico de sistemas de control. Ecuaciones de espacio - estado*. Obtenido de
<http://www.monografias.com/trabajos107/analisis-basico-sistemas-control-a-ecuaciones-espacio-estado/analisis-basico-sistemas-control-a-ecuaciones-espacio-estado2.shtml>
- UNER. (31 de Octubre de 2017). *METODO DEL ESPACIO DE ESTADO*. Obtenido de
http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/control/archivos/material/Anexos/anexo_ve.pdf

UNET. (03 de noviembre de 2016). *Sensores de Temperatura*. Obtenido de Sensores de Temperatura:
<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/Sensores%20de%20Temperatura.htm>

Zamudio, R. S. (11 de noviembre de 2009). *Geek Factory*. Obtenido de Geek Factory:
<https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-pic/midiendo-temperatura-max6675/>

ANEXOS

Anexo 1: Características técnicas del barniz AEV ULTIMEG 2000/380

ULTIMEG 2000/380 es un barniz de tipo alkyd fenólico con un elevado punto de ignición que proporciona una película resistente, de excelentes propiedades aislantes y muy buena adherencia en todo el rango de temperaturas de utilización hasta la clase H (180°C).

| Propiedades al suministro | Método de test | Valores | Unidad |
|---------------------------|------------------|-------------|----------|
| Viscosidad a 25°C | BS 3900 PT A6 B4 | 115 a 145 | segundos |
| Contenido de sólidos | | 48 ± 2 | % |
| Densidad | | 0.92 – 0.94 | - |
| Punto de Ignición | | 40 | °C |

Fuente: (AEV.UK,2018)

Especificaciones del tiempo de curado del barniz AEV ULTIMEG 2000/380

El tiempo de curado escogido por cada cliente dependerá del tamaño del componente y su diseño, y eficiencia del horno. Típicamente:

| | | |
|------------------|-----|-----|
| Tiempo (horas) | 4 | 2 |
| Temperatura (°C) | 180 | 220 |

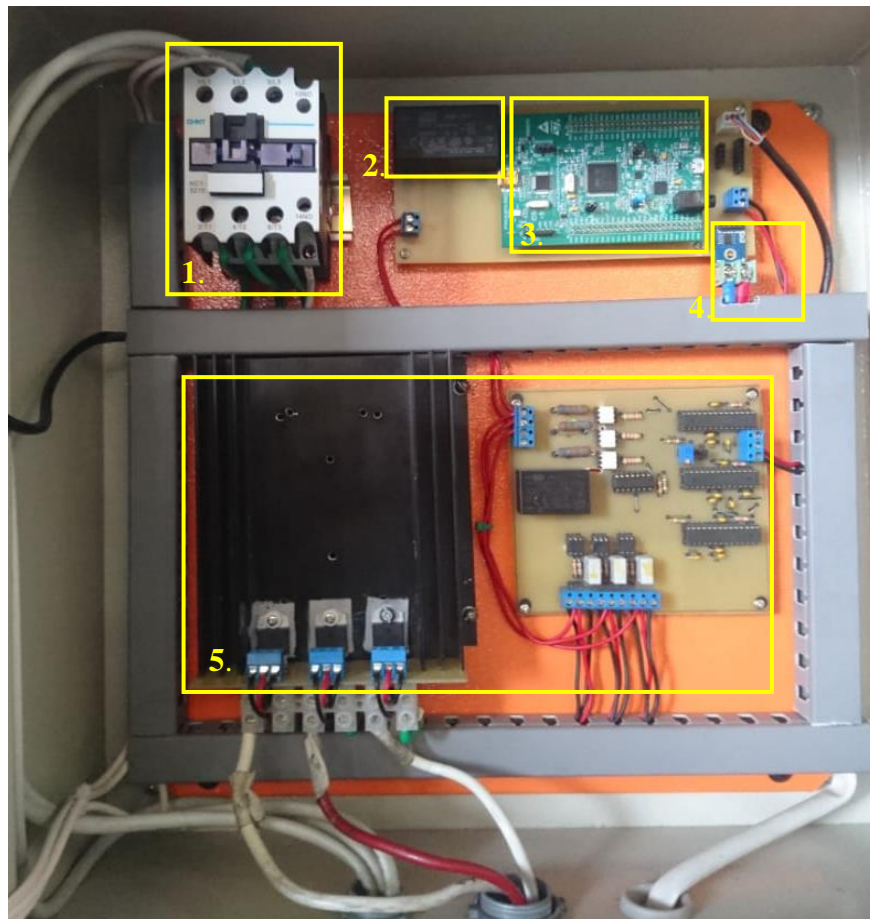
Fuente: (AEV.UK,2018)

Anexo 2. Características técnicas del barniz DOLPHON CC-1105

| | |
|---|-------------------|
| Densidad a 25°C | 9.6-10 lb/gal |
| Viscosidad | 300-800 cps 10RPM |
| Punto de inflamabilidad | >375 °F |
| Tiempo de curado a 170°C | 110-180 minutos |
| Conductividad térmica, BTU-in./hr-ft ² -°F | 0.53 |

Fuente: (Dolphs,2018)

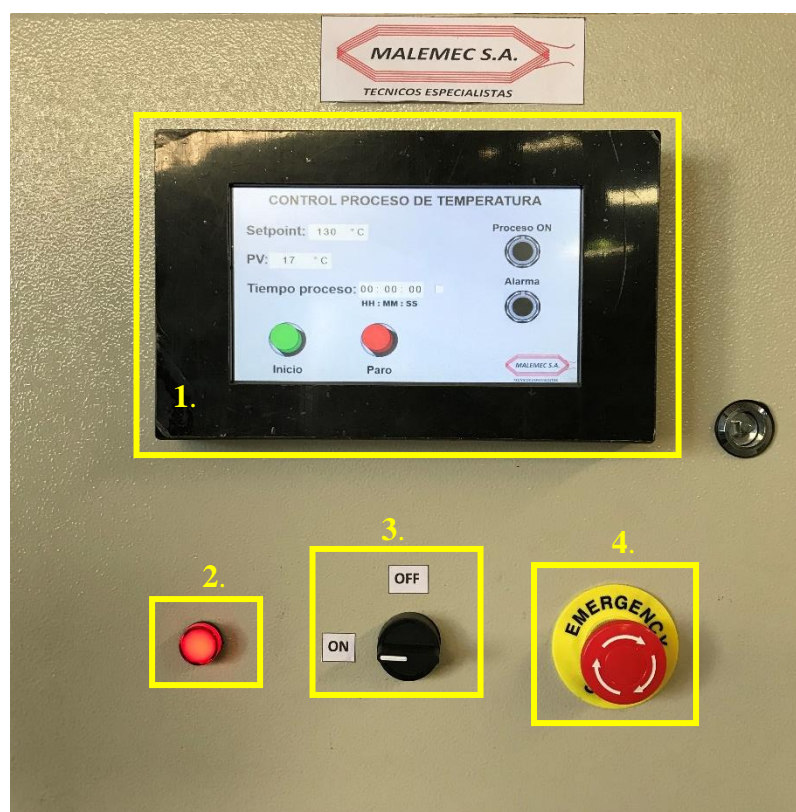
Anexo 3: Descripción de los componentes internos del tablero de control



| Ítem | Descripción |
|------|--|
| 1 | Contactor 3P, trifásico 30 A – 220 V AC. Entrada trifásica 220 V hacia el tablero. |
| 2 | Transformador 220 V AC – 5 V DC. Energiza la tarjeta de adquisición de datos. |
| 3 | Tarjeta de adquisición STM32F407 Discovery. Encargada del proceso de funcionamiento del control por espacio de estados. |
| 4 | Módulo MAX 6675, entrada de la termocupla tipo k. Realiza la lectura de los datos obtenidos por la termocupla y envía a la tarjeta de STM32F407 Discovery. |
| 5 | Etapas de potencia. |

Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales

Anexo 4. Descripción de los componentes externos del tablero de control



| Ítem | Descripción |
|------|-----------------------------------|
| 1 | Pantalla touch |
| 2 | Indicador de encendido de tablero |
| 3 | Selector ON/OFF |
| 4 | Paro de emergencia |

Elaborado por: Fernando Tapia y Vladimir Nogales